

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Metodika výpočtu zkratových poměrů a dynamických účinků
zkratových proudů v distribučních a průmyslových VN
rozvodech.**

**Methodology of Calculation of Short-circuit Conditions and
Dynamic Effects of Short-circuit Currents in Distribution and
Industrial HV Distribution Systems.**

2018

Bc. Patrik Polcer

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Patrik Polcer**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: Metodika výpočtu zkratových poměrů a dynamických účinků
zkratových proudů v distribučních a průmyslových VN rozvodech.
Methodology of Calculation of Short-circuit Conditions and Dynamic
Effects of Short-circuit Currents in Distribution and Industrial HV
Distribution Systems.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zkratové poměry ve vysokonapěťových rozvodech.
Nutné předpoklady, zjednodušení a základní metody výpočtu.
Návrh praktické metodiky a vytvoření SW aplikace pro podporu výpočtu při běžném projektování a návrhu VN rozvodů.
Vytvoření databáze parametrů komerčně dostupných a používaných komponentů VN rozvodů.
Porovnání výsledků a vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Mešter, M.: Výpočet skratových proudů v trojfázových střídavých systémech, ABB Elektro Bratislava, 2005
Anderson, Fouad, Power System Control and Stability, 2nd Edition, Wiley-IEEE Press, 2002
ČSN EN 60909 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách
ČSN 33 3022-1 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách
IEC 60909-0,1,2,4
ČSN 33 3051 Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení
Katalogové listy a manuály VN komponentů (kabely, transformátory, reaktory...)
Další dle pokynů vedoucího a konzultanta diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2018


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych pár slovy poděkoval svému vedoucímu v rámci společnosti Q-ELEKTRIK a.s. panu Ing. Romanu Vaculíkovi a také vedoucímu z řad školních panu Ing. Petru Bernatovi, Ph.D. za jejich odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

V Ostravě dne: *30. dubna 2018*


.....
podpis zástupce

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá řešením výpočtů zkratových proudů a dimenzování. Hlavním úkolem bylo vytvořit výpočetní aplikaci pro orientační ověření výsledků při návrhu kabelových tras a rozvaděčů.

Teoretická část pojednává o problematice metodiky výpočtů zkratových proudů a jejich účinků dle příslušné normy ČSN EN 60909-0.

V praktické části je popsána samotná výpočetní aplikace Zkraty. Je zde objasněn princip, na jakém aplikace funguje a uvedeny jsou také vzorce, které byly použity pro výpočty. Nechybí zde ani krátký popis úloh jednotlivých částí, ze kterých se aplikace skládá. Poslední bod porovnává rozdíly výsledků, dosažených pomocí ručního výpočtu s výsledky výpočtového softwaru.

Klíčová slova

Zkrat; zkratový proud; počáteční rázový zkratový proud; nárazový zkratový proud; ekvivalentní oteplovací proud; minimální průřez

Abstract

This diploma thesis is focused on the solution of counting short-circuit currents and design of cables and switchboards. Main goal was creating of an application, which can verify possible results during the design of cable trays and switchboards.

The theoretical part deals with the method of calculation short-circuit currents and their effects according to the relevant standard ČSN EN 60909-0.

In the practical part is described the computational application of Shortcuts itself. There is also explained the principle of application and the equations which were used for the calculations. The practical part includes also a short description of the tasks from each parts of the application. In the end of the thesis are compared the differences between results of manual theoretical calculation and of computational software.

Key words

short-circuit; short-circuit current; initial symmetrical short-circuit current; peak short-circuit current; thermal equivalent short-circuit current; minimum cross section

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
a	-	Točivý operátor
c	-	Napěťový součinitel
c_{\max}	-	Maximální napěťový součinitel
c_{\min}	-	Minimální napěťový součinitel
f	Hz	Frekvence
I''_k	A	Počáteční souměrný rázový zkratový proud
$i_{d.c.}$	A	Stojnosměrná složka zkratového proudu
i_p	A	Nárazový zkratový proud
I_b	A	Souměrný zkratový vypínací proud
I_k	A	Ustálený zkratový proud
$I''_{k3\max}$	A	Maximální počáteční rázový zkratový proud
$I''_{k2\min}$	A	Minimální počáteční rázový zkratový proud
I_{th}	A	Ekvivalentní oteplovací proud
K	-	Koeficient materiálu vodiče
L_k	Ω/km	Indukčnost vodiče na kilometr
m	-	Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zk. proudu
n	-	Součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zk. proudu
P_{\max}	W	Maximální dodávaný výkon
$P_{Z\max}$	W	Maximální ztráty
P_R	W	Záložní výkon
R	Ω	Odpor
R_L	Ω	Rezistance vedení
R_{L20}	Ω	Rezistance vedení při 20 °C
R_k	Ω/km	Odpor vodiče na kilometr
S''_k	VA	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
S_{\min}	mm^2	Minimální průřez vodiče
S	mm^2	Průřez vodiče
S_k	VA	Zkratový výkon nadřazené soustavy

Seznam použitých symbolů a zkratk

S_n	VA	Jmenovitý výkon
t_{\min}	s	Minimální doba vypnutí
T_k	s	Předpokládaný čas vypnutí zkratu
t_k	s	Čas vypnutí zkratu
U	V	Napětí
U_n	V	Jmenovité napětí
u_k	%	Procentní napětí nakrátko
X	Ω	Reaktance
X_k	Ω/km	Reaktance vodiče na kilometr
$\underline{Z}_{(1)}, \underline{Z}_{(2)}, \underline{Z}_{(0)}$	Ω	Zkratová impedance sousledná, zpětná a netočivá
Z_c	Ω	Zkratová impedance
α	-	Součinitel pro praktické účely pro materiál vedení
κ	-	Součinitel pro výpočet rázového zkratového proudu
ϑ_e	$^{\circ}\text{C}$	Teplota vodiče na konci zkratu
ϑ_{\max}	$^{\circ}\text{C}$	Maximální teplota vodiče na konci zkratu
ES	-	Elektrizační soustava
nn	-	Nízké napětí
vn	-	Vysoké napětí

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
Obrázek 2.1	Elektrizační soustava [16]	- 2 -
Obrázek 3.1	Třífázový zkrat	- 7 -
Obrázek 3.2	Třífázový zemní zkrat	- 7 -
Obrázek 3.3	Dvoufázový zkrat	- 7 -
Obrázek 3.4	Dvoufázový zemní zkrat	- 8 -
Obrázek 3.5	Jednofázový zkrat	- 8 -
Obrázek 3.6	Průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu	- 9 -
Obrázek 3.7	Průběh zkratového proudu elektricky blízkého zkratu	- 10 -
Obrázek 4.1	Sousledná složka zkratové impedance	- 15 -
Obrázek 4.2	Zpětná složka zkratové impedance	- 15 -
Obrázek 4.3	Netočivá složka zkratové impedance	- 16 -
Obrázek 4.4	Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R [3]	- 21 -
Obrázek 4.5	Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu	- 22 -
Obrázek 4.6	Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu	- 22 -
Obrázek 5.1	Schéma navrhované sítě	- 24 -
Obrázek 5.2	Názorný výstřižek z listu Vstupní data	- 25 -
Obrázek 5.3	Názorný výstřižek z listu Tabulky	- 26 -
Obrázek 6.1	Náhradní schéma pro výpočet maximálního zkratového proudu	- 30 -
Obrázek 6.2	Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu	- 36 -
Obrázek 6.3	Celková náhradní impedance pro hladinu zkratu 0,4 kV	- 40 -
Obrázek 6.4	Náhradní schéma pro výpočet maximálního zkratového proudu	- 41 -
Obrázek 6.5	Celková náhradní impedance pro hladinu zkratu 22 kV	- 43 -

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
Tabulka 2.1	Kvantitativní vyjádření kmitočtu ES [1]	- 3 -
Tabulka 4.1	Napěťový součinitel c [3]	- 13 -
Tabulka 4.2	Hodnoty koeficientu K pro vodiče	- 23 -
Tabulka 6.1	Parametry kabelů	- 31 -
Tabulka 6.2	Přehled výsledků vypočtených proudů $I_{k3\max}''$, I_{th} , i_p	- 35 -
Tabulka 6.3	Hodnoty maximálních dovolených teplot při zkratu	- 37 -
Tabulka 6.4	Přehled výsledků minimálních zkratových proudů $I_{k2\min}''$	- 41 -
Tabulka 6.5	Přehled vypočtených hodnot pro vedení I_{th} a S_{min}	- 45 -
Tabulka 6.6	Přehled výsledků uvedených příkladů	- 46 -

Obsah

1	Úvod.....	- 1 -
2	Napájení průmyslových objektů.....	- 2 -
2.1	Elektrizační soustava.....	- 2 -
2.2	Stupně spolehlivosti dodávky elektrické energie.....	- 3 -
3	Teorie zkratových jevů.....	- 5 -
3.1	Definice.....	- 5 -
3.2	Druhy zkratů	- 6 -
3.3	Průběhy zkratového proudu	- 9 -
3.4	Účinky zkratových proudů.....	- 10 -
4	Metodika výpočtu zkratových proudů.....	- 12 -
4.1	Základní předpoklady výpočtu.....	- 12 -
4.2	Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů	- 12 -
4.2.1	Maximální zkratové proudy	- 12 -
4.2.2	Minimální zkratové proudy	- 12 -
4.3	Metody výpočtu	- 14 -
4.3.1	Metoda ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu.....	- 14 -
4.3.2	Metoda souměrných složek	- 14 -
4.4	Zkratové impedance prvků elektrizační soustavy	- 16 -
4.4.1	Všeobecně	- 16 -
4.4.2	Síťový napáječ.....	- 16 -
4.4.3	Dvouvinutové transformátory	- 17 -
4.4.4	Venkovní a kabelové vedení	- 18 -
4.5	Výpočet zkratových proudů	- 19 -
4.5.1	Všeobecně	- 19 -
4.5.2	Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	- 19 -
4.5.3	Nárazový zkratový proud i_p	- 21 -
4.5.4	Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}	- 21 -
4.5.5	Minimální průřez S_{min}	- 23 -
5	Softwarová aplikace Zkraty	- 24 -
5.1	Popis navrhované sítě.....	- 24 -
5.2	Vstupní data	- 25 -

5.3	Tabulky	- 26 -
5.4	Výpočty	- 26 -
5.4.1	Základní vztahy pro výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách-	27 -
5.4.2	Výpočet sousledných parametrů prvků soustavy ve fyzikálních jednotkách-	27 -
5.5	Výstupní zpráva	- 28 -
6	Výpočet zkratových poměrů	- 30 -
6.1	Výpočet maximálního zkratového proudu	- 31 -
6.2	Výpočet minimálního zkratového proudu.....	- 36 -
6.3	Výpočet minimálního průřezu pro kabelové vedení W 2	- 41 -
6.4	Zhodnocení výsledků pro uvedené příklady	- 46 -
	Závěr	- 47 -
	Použitá literatura	- 48 -
	Seznam příloh.....	xlix

1 Úvod

V dnešním moderním světě má vše tendenci zrychlovat. Na úkor toho se také urychlují pracovní postupy a procesy. Mimo jiné i samotné procesy výpočtů a návrhů projektů. Tímto se nabízí větší prostor pro vytváření chyb a nepřesností. Proto v reakci na přesnější a rychlejší výpočty vznikají podpůrné softwary, které při správném použití práci zjednoduší. Ovšem řešení k zjednodušení se naskytá spousta. Jednou z možností, jak si práci zjednodušit individuálně je osvojit si určité postupy anebo si případně podobný program, který bude pracovat právě na základě známých postupů, vytvořit osobně. Přesně tak jako je cílem této diplomové práce.

Projektová činnost si s sebou nese velkou odpovědnost, za kterou stojí jediná osoba. Tato osoba zodpovídá za správnost projektu od samého začátku až po konečnou verzi. Pokud se na výrobě projektu podílí více osob, je nutné, ještě před jeho schválení jako celku, vše řádně zkontrolovat a přepočítat. Jak vizuální kontrola, tak i kontrola výpočtů může, v závislosti na rozsahu a složitosti projektu, zabrat spoustu času. Aplikováním pomocných softwarů pro výpočty může, čas strávený nad přepočítáváním podstatně zkrátit.

Jak již bylo zmíněno hlavní náplní této práce je vytvoření funkční aplikace. Výsledkem aplikace budou orientační hodnoty zkratových proudů pro kontrolu návrhu kabelových tras a rozvaděčů. Z výsledných hodnot se určí, jestli je jejich návrh proveden správně, zda odolají zkratovým proudům a jejich nepříznivým účinkům. Z výsledků bude vytvořena tzv. *Výstupní zpráva*, kterou bude možno vytisknout a případně přiložit k danému projektu.

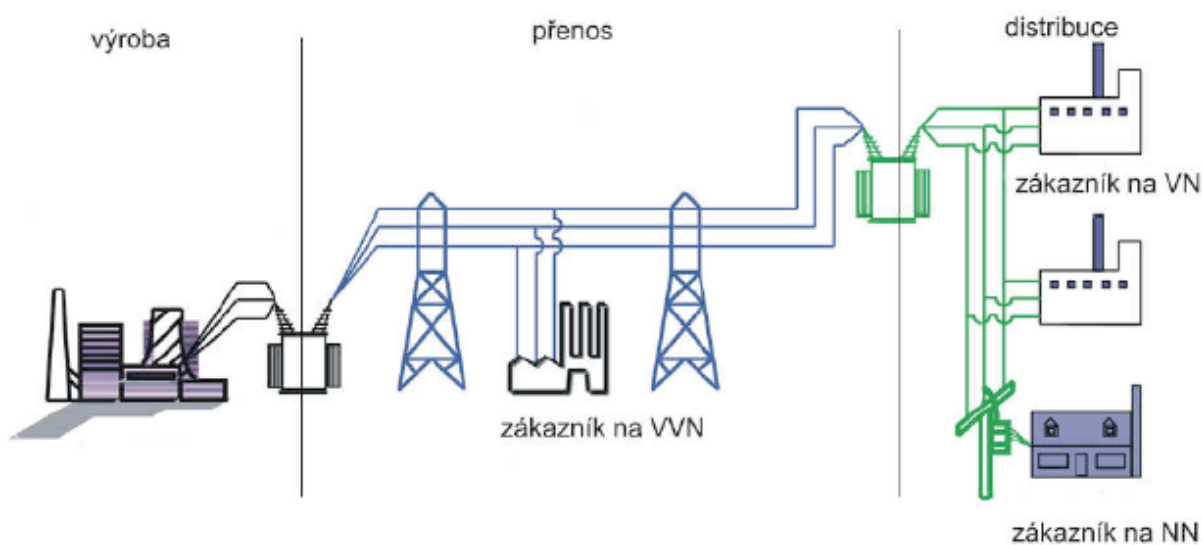
Práce se skládá ze dvou částí. První z částí se zabývá teoretickým popisem metodiky výpočtů zkratových proudů, základními principy vzniku zkratů a základními druhy zkratů dle příslušné normy ČSN 60909-0.

Obsahem druhé, praktické části je samotná výpočtová aplikace Zkraty. Začíná popisem principu funkce aplikace a jejího schématu. Dále pak charakterizuje funkci a úlohu jednotlivých částí, které tvoří tvář celého softwaru. Také jsou zde uvedeny vzorce pro výpočty a následné porovnání výsledků vypočtených ruční metodou s výsledky vypočtenými pomocí aplikace.

2 Napájení průmyslových objektů

2.1 Elektrizační soustava

Elektrizační soustavou (dále jen ES) podle [1] chápeme jako vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie, a to včetně řídicích, ochranných, informačních a měřicích prvků. Pokud se ES nachází v rovnovážném stavu, potom jsou stavové veličiny konstantní. Ovšem ES jako takovou, musíme chápat jako dynamický systém, protože okamžité hodnoty všech vnitřních stavových veličin závisí na okamžitých hodnotách zařízení a na stavu ES v daném okamžiku. Změnou jednoho z parametrů ES, čímž může dojít změnou zatížení, zapnutím nebo vypnutím vedení a dalšími, dochází k přechodným jevům, které po odeznění jejich vlivů způsobí nový rovnovážný stav v ES.



Obrázek 2.1 Elektrizační soustava [16]

Hlavním a také základním úkolem ES je spolehlivě dodávat elektrickou energii odběratelům dle předem dohodnutých požadavků, co se týče množství a kvality v požadovaném čase s minimálními ztrátami, náklady a dopadem na životní prostředí.

Zajištění požadovaného množství elektrické energie

K zajištění dostatečného množství el. energie je nutné v ES sledovat výkonovou bilanci a hlídat směry toků výkonů. S těmito parametry v ES je nutno brát ohled už při plánování rozvoje ES.

Zajištění výkonové rovnováhy v každém časovém okamžiku, tedy výkon dodávaný (vyrobený) P_{\max} (MW) musí být roven výkonu odebíranému všemi spotřebiteli včetně ztrát $P_{Z\max}$ (MW), a to i včetně záložního výkonu P_R (MW), který napomáhá pokrývat případné výkyvy výkonů, zaručují výkonovou rovnováhu a spolehlivou dodávku potřebného množství el. energie pro odběratele. Musí být tedy splněna následující nerovnost

$$P_{\max} \geq P_{Z\max} + P_R \quad (2.1)$$

Zajištění požadované kvality elektrické energie

Kvalitu elektrické energie obecně ovlivňuje spolehlivost a také bezpečnost provozu zařízení, se kterou souvisí ekonomická efektivnost čili minimalizace nákladů na výrobu, údržbu a provoz zařízení. Kvalita je ověřována v uzlech ES, ze kterých jsou vyvedeny větve pro napájení jednotlivých odběratelů. Hlavními parametry podle, kterých se určuje kvalita elektrické energie jsou napětí pro danou hladinu U (kV) a kmitočet f (Hz). Pro důkladnější ověření kvality dále používáme parametry jako jsou podíl harmonických napětí vyšších řádů a symetričnost napětí.

Co se kmitočtu týče, je to kvalitativní celosystémový parametr, který má pevně definované vlastnosti viz Tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 Kvantitativní vyjádření kmitočtu ES [1]

Typ systému	UCTE	Ostrovni provoz
Základní kmitočet (1. harmonická)	50 Hz	50 Hz
Tolerance pro 99,5 % roku	$\pm 1\%$ (49,5 Hz – 50,5 Hz)	$\pm 2\%$ (49 Hz – 51 Hz)
Tolerance pro 100 % roku	+4% – 6% (47 Hz – 52 Hz)	15% (42,5 Hz – 57,5 Hz)

2.2 Stupně spolehlivosti dodávky elektrické energie

Celkový návrh elektrizační soustavy také ovlivňují stupně dodávky el. energie odběratelům. Tyto stupně v sobě zahrnují případné přerušení a nežádoucí snížení kvality dodávky energie. Ovlivňují druhy distribučních sítí, počet a výkon zdrojů, transformátorů a jejich nastavení odboček. Případné příčiny přerušení dodávky energie nebo její snížení kvality, jsou způsobeny např. poruchami v ES, nesprávnou predikcí potřebného výkonu či šatnou manipulací v ES a v neposlední řadě živelnými pohromami. Většinou jde o příčiny nesoucí si tzv. nahodilý charakter, to znamená, že nedokážeme odhadnout kdy a kde nastanou.

Jakmile dojde k přerušení el. energie dochází ke sčítání škod. Určuje se množství a cena nedodané el. energie. Proto je nutné při návrhu ES přihlížet na závislosti dodávky energie k jednotlivým odběratelům. Podle tohoto hlediska byly vytvořeny následující skupiny.

Dodávka 1. stupně spolehlivosti

První stupeň zahrnuje všechny odběratele, kteří musí být zajištěni za všech okolností. V těchto případech by mohl výpadek napájení znamenat velké ekonomické ztráty, například narušení nebo zničení technologického procesu včetně zařízení a výroby nebo ohrožení na zdraví či lidských životů. Napájení je tedy řešeno ze dvou nebo více na sobě nezávislých zdrojů o takovém výkonu, aby při výpadku jednoho z nich byl ten druhý schopen pokrýt celkovou spotřebu objektu. Druhý (záložní) napájecí zdroj ovšem nemusí být vždy elektrický, lze použít například neelektrický pohon (vodní, spalovací apod.)

Spotřeba 2. stupně důležitosti

Odběratelé zařazení do druhého stupně dodávky, pokud je to možné, by zajištění měli být, ovšem nevyžadují se zvláštní opatření. Nepřetržitost dodávky není tak zásadní. Výpadek by mohl způsobit podstatné omezení nebo zastavení výroby, kde ohrožení na zdraví či životů nenastane. Záloha je tvořena tak, aby se vzájemně zajistila bez dalších větších investic.

Spotřeba 3. stupně důležitosti

Zde už potom patří odběratelé typu domácností, škol apod., u kterých dodávka el. energie není tak důležitá a nezpůsobí žádné větší škody ve výrobě či újmě na životech. Náhradní napájecí zdroje zde nejsou zapotřebí. Průmyslový závod jako celek obsahuje více zařízení, které spadají do různých stupňů, a proto se záloha dimenzuje jen na pokrytí zařízení patřící do prvního stupně dodávky elektrické energie.

Zásady zlepšení spolehlivosti dodávky

- Spolehlivost jednotlivých prvků jako jsou např. transformátor, vedení, vypínačů atd.
- Důkladná montáž, údržba a servis všech částí ES. Doporučena je i eliminace prvků zařazených do série napájecí větve, jelikož každý z nich může být zdrojem poruchy.
- Paralelní zapojování odběrných míst, prvků či vedení.
- Přenos na vyšších hladinách napětí.
- V případě vn sítí je to volba druhu sítě. [2]

3 Teorie zkratových jevů

3.1 Definice

Zkrat – náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

Mezifázový zkrat – náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodiči se spojením na zem nebo bez něj.

Zkrat mezi fází a zemí (jednofázový zkrat) – náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi vodičem a zemí v soustavě s uzlem uzemněným přímo nebo přes malou impedanci.

Zkratový proud – nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

Předpokládaný zkratový proud – proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' – pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$: Pak tedy $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$.

Stejnosměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu – střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Souměrný zkratový vypínací proud I_b – efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení

Ustálený zkratový proud I_k – efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu.

Jmenovité napětí sítě U_n – sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Napět'ový součinitel c – poměr mezi napětím ekvivalentního napět'ového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy – impedance sousledné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy – impedance zpětné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy – impedance netočivé složkové soustavy viděná z místa zkratu; zahrnuje trojnásobek impedance Z_N mezi uzlem transformátoru a zemí.

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ elektrického zařízení – poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné sousledné složkové soustavy napětí.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ elektrického zařízení – Poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné zpětné složkové soustavy napětí.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ elektrického zařízení – Poměr napětí proti zemi a zkratového proudu jedné fáze elektrického zařízení při napájení ze střídavého napěťového zdroje, přičemž tři paralelní fázové vodiče jsou použity pro proud vycházející ze zdroje a čtvrtý vodič a/nebo zem tvoří společné zpětné vedení.

Minimální doba vypnutí t_{\min} – Nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} – Efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění. [3]

3.2 Druhy zkratů

Zkraty jsou jednou z nejzávažnějších poruch. Řadíme je mezi elektromagnetické přechodné děje, které je nutné v elektrických zařízeních neopomínat. Zkrat ve většině případů způsobí několikanásobný vzrůst proudu nad jeho jmenovitou hodnotu tzv. zkratový proud. Doba trvání přechodného děje je řádově 0,01 s. Výpočtem zkratových proudů se zabývá norma ČSN EN 60909.

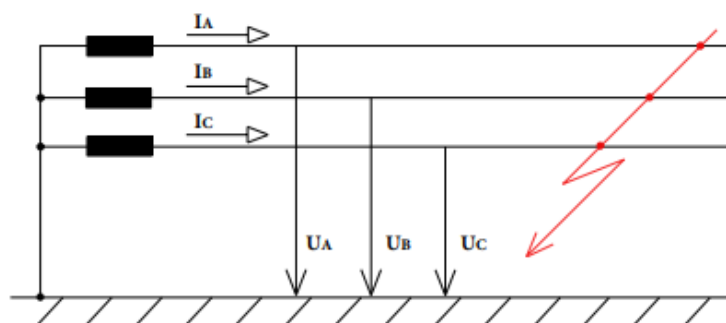
V průběhu zkratu dochází v síti k poklesu napětí (při dokonalém zkratu napětí klesá téměř k nulové hodnotě), který způsobuje velký zkratový proud. K místu poruchy, a tudíž k výsledné hodnotě zkratového proudu přispívají všechny možné zdroje v síti, v závislosti na jejich výkonech a také na vzdálenosti od místa zkratu.

Každý z jednotlivých prvků elektrizační soustavy např. transformátory, venkovní či kabelová vedení, generátory apod. mají svůj odpor. I přesto však teče obvodem velký zkratový proud. Jestliže by nastala situace, kdy by žádný z prvků neměl svůj odpor, pak by obvodem, po aplikaci Ohmova zákona, tekla proud nekonečně velký. Avšak ve skutečnosti k tomu dojít nemůže. Celkový odpor zkratového obvodu se skládá z vnitřních impedancí generátorů, transformátorů, impedancí vedení a přechodových

odporů vyskytujících se na spojích či v samotném místě zkratu. A právě kvůli těmto vlastnostem je konečná velikost zkratového proudu omezena. Ovšem i přes všechny tyto okolnosti jsou destruktivní účinky zkratového proudu tak velké, že dochází k ohrožení, jak celé elektrizační soustavy, tak i k ohrožení životů obsluhy.

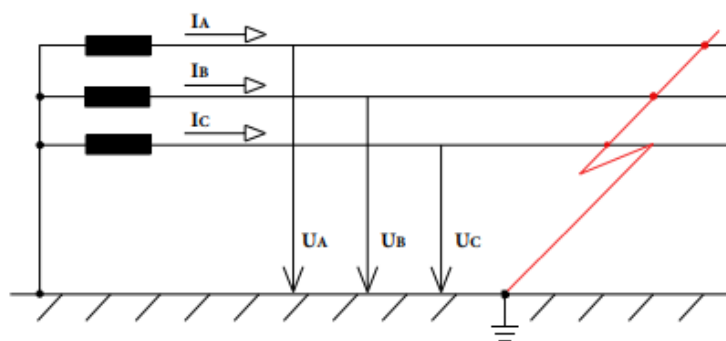
Ke zkratu může dojít více způsoby. Pak lze zkraty rozdělit na tyto druhy:

Třífázový zkrat – nastane současným spojení všech tří v jednom místě,



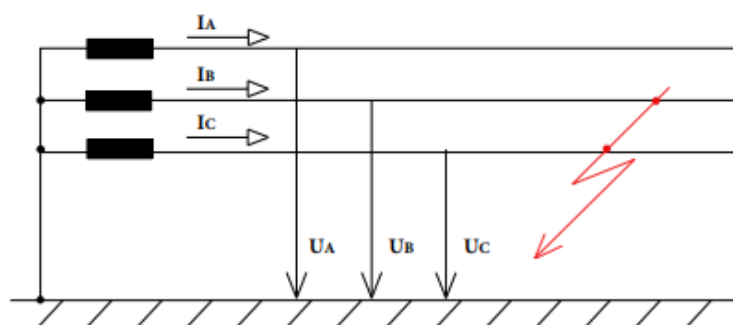
Obrázek 3.1 Třífázový zkrat

Třífázový zemní zkrat – současné spojení všech tří fází se zemí



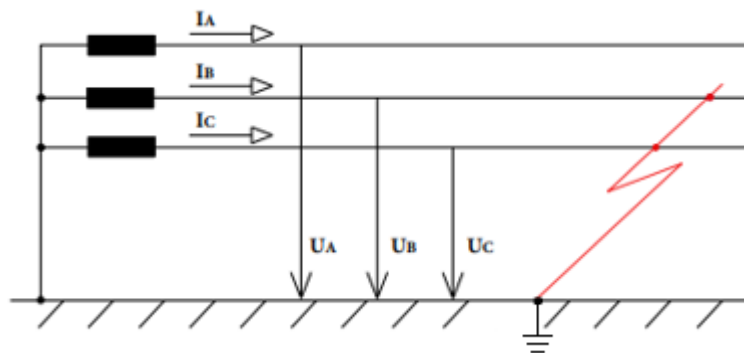
Obrázek 3.2 Třífázový zemní zkrat

Dvoufázový zkrat – spojení dvou libovolných fází,



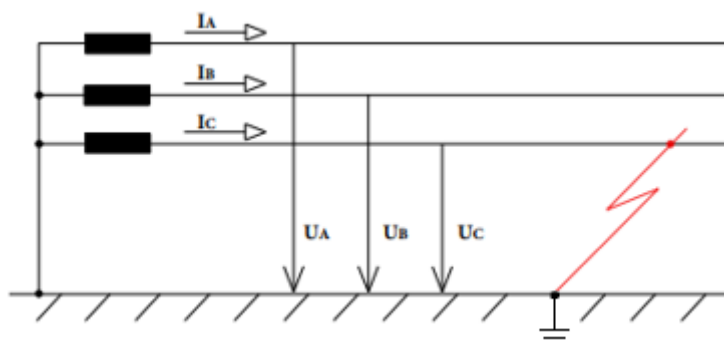
Obrázek 3.3 Dvoufázový zkrat

Dvoufázový zemní zkrat – nastane spojením dvou libovolných fází se zemí,



Obrázek 3.4 Dvoufázový zemní zkrat

Jednofázový zkrat – nastává spojením libovolné fáze se zemí,



Obrázek 3.5 Jednofázový zkrat

Dalším způsobem, jak rozlišujeme zkraty jsou zkraty souměrné a nesouměrné.

Souměrný zkrat

Pravděpodobnost vzniku souměrného třífázového zkratu je jen ve všech třech fázích najednou. Souměrný zkrat postihne všechny tři vodiče stejnou mírou a těmi pak prochází zkratový proud o stejné velikosti. Nejčastěji se tento druh zkratu vyskytuje v kabelových sítích. Oblouk vznikající při jakémkoliv zkratu, jednoduše poškodí izolaci mezi ostatními fázemi. Souměrný zkrat vytváří nejvyšší hodnoty předpokládaného zkratového proudu, jaké mohou při zkratu nastat.

Nesouměrný zkrat

Oproti souměrnému zkratu zatěžuje obvod nesouměrně, tedy zasáhne buďto dvě fáze samostatně, dvě fáze spojené se zemí nebo jen jednu fází spojenou se zemí.

- dvoufázový zkrat,
- dvoufázový zemní zkrat,
- jednofázový zkrat [4]

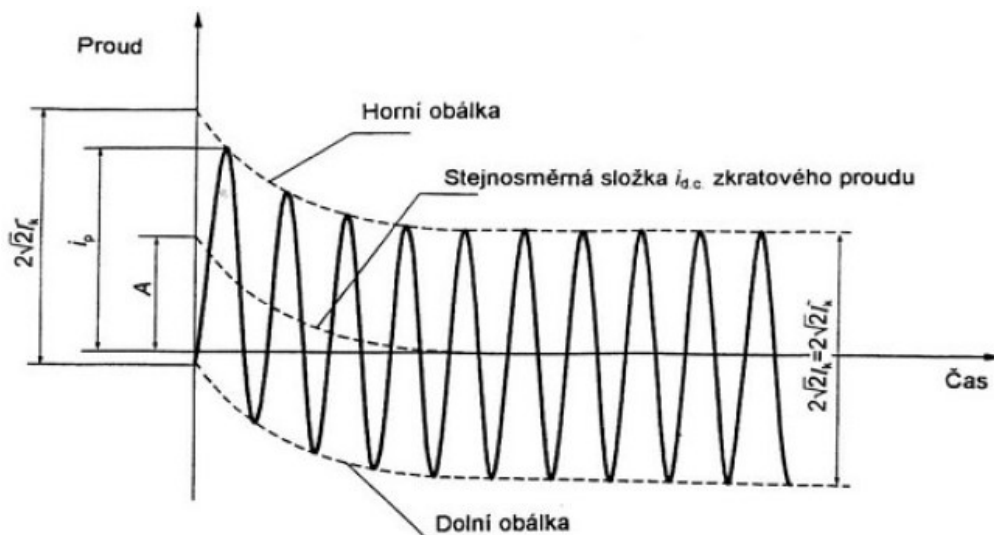
3.3 Průběhy zkratového proudu

Na způsobu, kterým je zkrat vůbec nezáleží, protože vždy se bude jednat o přechod z jednoho ustáleného stavu do druhého. Tento přechod s sebou nese také změnu proudu, který se změní na nový ustálený zkratový proud. Změny vzniklé přechodem nenastanou skokově. Po dobu trvání zkratu se dějí změny, které mají svou určitou dobu trvání v závislosti na velikosti elektromagnetické energie ve zkratovém obvodu. Proud se po dobu trvání přechodného jevu mění i nadále se svou periodicitou, ale také zde působí vyrovnávací proudy, které byly přechodem vyvolány.

Obecně se průběh zkratového proudu skládá ze složky stejnosměrné $i_{d.c.}$ a složky střídavé, která kmitá kolem již zmíněné složky stejnosměrné s určitým kmitočtem viz tabulka 2.1 a určitou amplitudou. [3]

Elektrický vzdálený zkrat

Zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

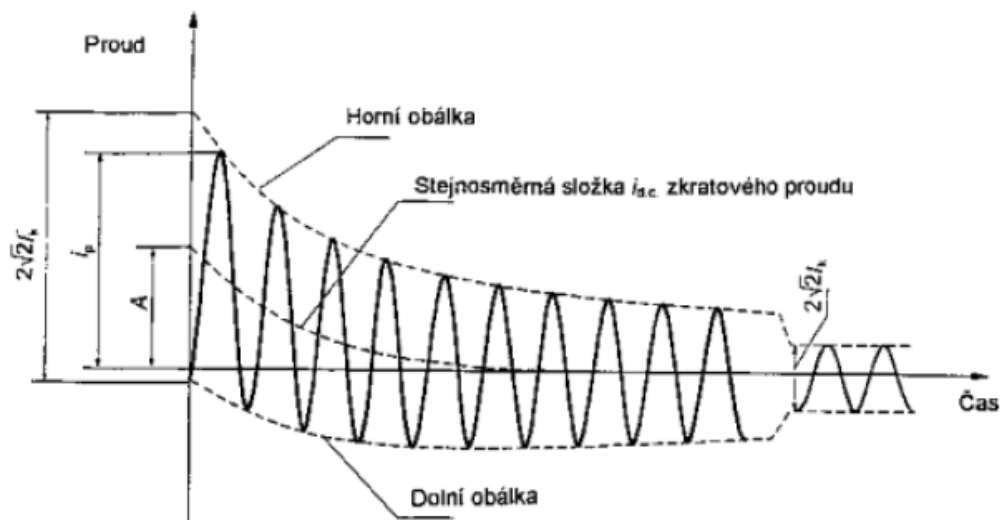


Obrázek 3.6 Průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu

- kde: I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud
 i_p nárazový zkratový proud
 I_k ustálený zkratový proud
 $i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu
 A počáteční hodnota stejnosměrné složky [3]

Elektricky blízký zkrat

Zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek synchronních motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů.



Obrázek 3.7 Průběh zkratového proudu elektricky blízkého zkratu

- kde: I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud
 i_p nárazový zkratový proud
 I_k ustálený zkratový proud
 $i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu
 A počáteční hodnota stejnosměrné složky [3]

3.4 Účinky zkratových proudů

Projevy zkratů v elektrickém zařízení nese četné nepříznivé následky, které ohrožují nejen bezpečnost provozu, bezpečnost zařízení, ale také vážně ohrožují bezpečnost obsluhujících osob.

Proto je při návrhu elektrických zařízení nutné dimenzovat s ohledem nejen na normální provozní stavy, ale především i na stavy vznikající při zkratech, aby případné následky nebyly tak rozsáhlé.

Dynamické síly

Příčinou vzniku je vzájemné elektromagnetické působení proudů v sousedních vodičích a jejich velikost je jim přímo úměrná. Největší destruktivní silou působí první půlvlna amplitudy předpokládaného zkratového proudu tzv. nárazový zkratový proud. A právě správným dimenzováním můžeme předejít nežádoucím účinkům tohoto proudu.

Tepelné účinky

Zkratový proud s sebou nese také nárůst teploty, který má opět nepříznivé účinky na zařízení. Nadměrné oteplení všech částí, v některých případech dosahující trojnásobku pracovní teploty daného zařízení, nemůže být v průběhu krátké doby trvání zkratu odvedeno zařízením do okolního prostředí. Jeho účinky převážně způsobují předčasné stárnutí izolace jak vodičů, tak i strojů a přístrojů.

Obloukový zkrat

S výskytem obloukového zkratu musíme počítat ve všech možných případech. Především je nutné s ním počítat v rozvodných zařízeních, kde jeho vznik může způsobit přímé ohrožení na bezpečnost obsluhujících osob. Nejčastější příčinou zapálení oblouku je chybná manipulace s odpojovači. Účinky elektrického oblouku převážně ovlivňuje to, na jakém zařízení vznikne. Na své okolí působí převážně tepelným a světelným zářením a také tlakem, vyvolaným energií oblouků.

Přepětí

Přepětí vznikají v sítích v souvislosti s vypínáním zkratových proudů a mohou dosahovat až dvojnásobku jmenovitého napětí U_n .

Výše uvedené nepříznivé účinky zkratových proudů jsou velmi vážné, hlavně z toho důvodu, že jejich působení se často projevuje současně. Nejvíce sledované jsou účinky dynamické a tepelné, kterým se dá předejít správným dimenzováním, čímž se omezí také zkratové proudy, ovšem nelze je úplně vyloučit. Použitím kvalitních zařízení s odbornou montáží a správným dimenzováním se dá také do jisté míry omezit vznik elektrického oblouku, avšak příčiny způsobené lidským pochybením tímto způsobem eliminovat nelze. [5]

4 Metodika výpočtu zkratových proudů

4.1 Základní předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratem mezi fází a zemí.
- po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti
- uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance pro síťové transformátory.
- odpory oblouku se neuvažují.
- všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Pro účely určení zkratové odolnosti elektrického zařízení nebo jeho dimenzování se zjišťuje maximální zkratový proud, minimální zkratový proud pak určuje hodnoty pro nastavení ochran, volbu pojistek, či kontrolu rozběhu motorů.

4.2 Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů

4.2.1 Maximální zkratové proudy

Pro výpočet maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\max} , dle Tabulky 4.1 pokud není příslušná národní norma.
- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu.
- pokud je použita ekvivalentní impedance Z_Q jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- motory musí být zahrnuty.
- užívají se rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C.

4.2.2 Minimální zkratové proudy

Pro výpočet minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{\min} , podle Tabulky 4.1 pokud není příslušná národní norma.
- vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- motory musí být zanedbány.

- rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při největší teplotě:

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\vartheta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (4.1)$$

kde R_{L20} je rezistence při teplotě 20°C ,
 ϑ_e teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu,
 α součinitel rovný $4 \cdot 10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku. [3]

Tabulka 4.1 Napěťový součinitel c [3]

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V	1,05 ³⁾ 1,1 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ >35 kV		

¹⁾ $c_{\max} U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_n pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno, potom $c_{\max} U_n = U_m$ nebo $c_{\min} U_n = 0,9 \cdot U_m$.

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí + 6% , například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.

⁴⁾ Pro soustavu nízkého napětí s tolerancí + 10%.

4.3 Metody výpočtu

4.3.1 Metoda ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu

Metoda použitá pro výpočet zavádí ekvivalentní napětový zdroj do místa zkratu. Ekvivalentní napětový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny ostatní zdroje napětí v soustavě jako jsou síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje, se nahrazují jejich vnitřní impedancí. Při použití této metody odpadá nutnost výpočtů toků výkonů v různých stavech před zkratem a potřeba znalosti provozních údajů např. poloha odboček transformátorů, buzení generátorů atd.

4.3.2 Metoda souměrných složek

Metoda používá pro výpočet zjednodušení ve formě použití souměrných složek v případě souměrných i nesouměrných zkratech. Nesouměrné zkraty mohou nastat při přerušení vodičů nebo díky vlivům jednofázových spotřebičů, kde souměrný provoz není možný. Při vzniku nesouměrného zkratu, který se projevuje přítomností stejnosměrné složky, se tedy tvoří určitá nesouměrnost, a právě tuto nesouměrnost lze touto metodou zjednodušit. Pro zjištění proudů v každé fázi se provede superpozice proudů tří souměrných složkových soustav dle následujících rovnic:

- proud sousledné složkové soustavy $I_{(1)}$
- proud zpětné složkové soustavy $I_{(2)}$
- proud netočivé složkové soustavy $I_{(0)}$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{L1(1)} + \underline{I}_{L1(2)} + \underline{I}_{L1(0)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{L2(1)} + \underline{I}_{L2(2)} + \underline{I}_{L2(0)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{I}_{L3(1)} + \underline{I}_{L3(2)} + \underline{I}_{L3(0)}\end{aligned}\quad (4.2)$$

Určíme-li fázi L1 jako referenční, budou mít rovnice následující tvar

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)}\end{aligned}\quad (4.3)$$

Kde:

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}\quad (4.3)$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3}\quad (4.4)$$

Potom postupnými úpravami dostaneme tvary rovnic pro souslednou, zpětnou a netočivou složku:

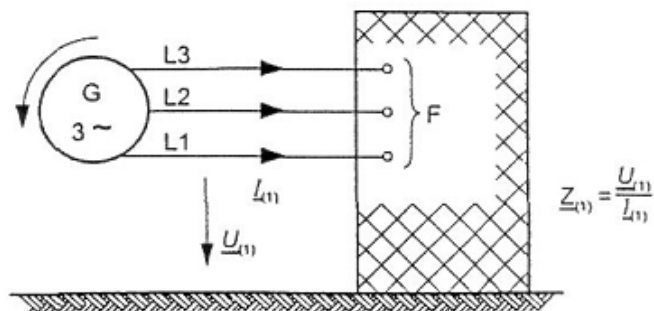
$$\begin{aligned} I_{(1)} &= \frac{1}{3} (I_{L1} + \underline{a} I_{L2} + \underline{a}^2 I_{L3}) \\ I_{(2)} &= \frac{1}{3} (I_{L1} + \underline{a}^2 I_{L2} + \underline{a} I_{L3}) \\ I_{(0)} &= \frac{1}{3} (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Výsledný tvar rovnic je rovněž možné aplikovat i pro výpočet napětí a impedancí obvodu. [6]

Rozlišují se tři složkové soustavy:

Sousledná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$

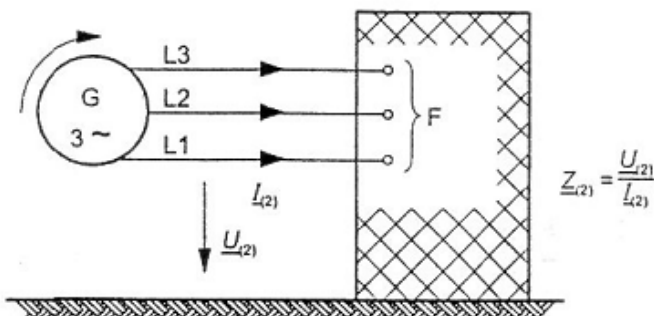
Dle následujícího obrázku lze souslednou zkratovou impedanci v místě zkratu F určit tak, že když se zdroj sousledné složky napětí, tedy souměrná soustava, v odpovídajícím pořadí fází (kladném) přiloží do místa zkratu. Všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.



Obrázek 4.1 Sousledná složka zkratové impedance

Zpětná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$

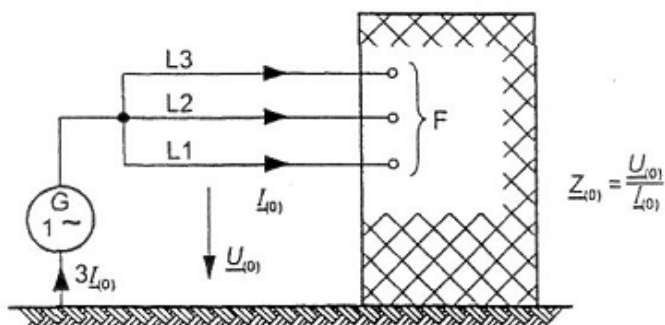
Kdežto v případě určení zpětné složky zkratové impedance v místě zkratu F, dle níže uvedeného obrázku 4.2, se provede přiložením souměrné soustavy napětí zpětné složky v odpovídajícím pořadí fází (záporném).



Obrázek 4.2 Zpětná složka zkratové impedance

Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$

Určení netočivé složky zkratové impedance v místě zkratu F podle obrázku 4.3, se provádí přiložením střídavého napětí mezi tři zkratované fáze a společné zpětné vedení (např. zemnicí soustavou, nulovým nebo zemnicím vodičem apod.).



Obrázek 4.3 Netočivá složka zkratové impedance

Pouze v případě točivých strojů se mohou hodnoty sousledných a zpětných impedancí navzájem lišit. Pokud se jedná o výpočet elektrický vzdálených zkratů, je obecně dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

4.4 Zkratové impedance prvků elektrizační soustavy

4.4.1 Všeobecně

U výpočtu zkratové impedance u zařízení typu síťového napáječe, transformátoru, venkovních či kabelových vedení, reaktoru apod. platí, že sousledná a zpětná složka zkratové impedance jsou si rovny $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

Netočivou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)} / \underline{I}_{(0)}$, jak je již uvedeno v kapitole 4.3.2, vypočteme podílem střídavého napětí a proudem netočivé složky. Jedná se o trojnásobek proudu protékajícího společným zpětným vedením.

Jestliže pro výpočet zkratových proudů je použita metoda ekvivalentního napětového zdroje, je nutné dle normy [3] impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků se musí vynásobit impedance korekčními součiniteli.

4.4.2 Síťový napáječ

Jedná-li se o síť, která napájí trojfázový zkrat, kde je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{kQ} v místě připojení napáječe, pak ekvivalentní impedance Z_Q v tomto bodě se vypočte dle následujícího vzorce:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (4.6)$$

Pokud je znám poměr R_Q/X_Q lze stanovit X_Q následovně:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (4.7)$$

U sítí vysokého, velmi vysokého nebo zvlášť vysokého napětí, které napájí transformátor, kde je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' v místě připojení, lze potom zkratovou impedanci Z_Q vztaženou na stranu nižšího napětí transformátoru určit jako:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (4.8)$$

kde U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v místě připojení napáječe Q ,
 I_{kQ}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě připojení napáječe Q ,
 c napěťový součinitel pro napětí U_{nQ} ,
 t_r jmenovitý převod transformátoru při základní poloze přepínače odboček.

Napáječe se jmenovitým napětím nad 35 kV napájených z venkovních vedení je možné považovat impedanci Z_Q za reaktanci, tj. $Z_Q = 0 + jX_Q$. Co se týče jiných případů, kde není známa žádná hodnota rezistance R_Q , je možné dosadit $R_Q = 0,1 \cdot jX_Q$, kde $X_Q = 0,995 \cdot Z_Q$.

Ze strany vyššího napětí transformátorů musí počáteční souměrné rázové zkratové proudy, minimální i maximální, musí udat provozovatel přenosové či distribuční soustavy nebo se musí určit postupnými výpočty dle normy [3].

4.4.3 Dvouvinut'ové transformátory

Sousledné zkratové impedance dvouvinut'ových transformátorů $Z_T = R_T + jX_T$ lze vypočítat následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4.9)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (4.10)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.11)$$

kde U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí
 I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí
 S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,
 P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru,
 u_{krT} jmenovité napětí nakrátko v procentech,
 u_{Rr} činná složka jmenovitého napětí transformátoru v procentech.

Výše uvedené údaje potřebné k výpočtu jsou jmenovité hodnoty transformátoru, výrobcem uváděné na štítku transformátoru. Na štítku nebo od výrobce je možné získat i údaje pro netočivou zkratovou impedanci.

Poměr R_T/X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. U výpočtu velkých transformátorů je možný předpoklad, že impedance tvoří pouze reaktance. Jejich odpor se započítává jen v případech, kdy počítáme nárazový zkratový proud nebo stejnosměrné složky.

U dvouvinutových transformátorů se také zavádí korekční součinitel K_T :
 $Z_{TK} = K_T \cdot Z_T$, kde $Z_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,5 \cdot x_T} \quad (4.12)$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru,
 c_{\max} z Tabulky 4.1 se shoduje se jmenovitým napětím sítě připojené ke straně nižšího napětí síťového transformátoru.

Korekční součinitel nesmí být opomenut i pro výpočty zpětných netočivých impedancí transformátoru. Ovšem pro blokové transformátory tento součinitel zavést nelze.

4.4.4 Venkovní a kabelové vedení

Souslednou zkratovou impedanci $Z_L = R_L + jX_L$ lze určit pomocí parametrů vodiče, jako jsou průřez a rozteč vodičů.

Činný odpor na jednotku délky R'_L venkovních vedení při teplotě vodiče 20 °C lze stanovit z poměru rezistivity ρ a jmenovitého průřezu q_n :

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (4.13)$$

Pro rezistivity lze použít následující hodnoty:

$$\text{Měď} \quad \rho = \frac{1}{57} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Hliník} \quad \rho = \frac{1}{33} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Slitinu hliníku} \quad \rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Reaktanci na jednotku délky X'_L je možno vypočítat v případě, že je provedena transpozice vedení ze vzorce:

$$X'_L = 2\pi f \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \cdot \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4.14)$$

kde	d	je geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo od středu svazku $d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}},$
	r	poloměr jednoduchého vodiče, v případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}},$ kde R je poloměr svazku,
	n	počet vodičů ve svazku, pro jednoduchý vodič $n=1$,
	μ_0	permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$.

Pro venkovní i kabelová vedení je možné souslednou i netočivou složku stanovit i měřením viz IEC 60909-4. Provádí se také výpočet netočivých impedancí pomocí poměrů $R_{(0)L}/R_L$ a $X_{(0)L}/X_L$ [3].

4.5 Výpočet zkratových proudů

4.5.1 Všeobecně

Jedná-li se o vzdálený zkrat, zkratový proud představuje součet následujících dvou složek:

- střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu
- stejnosměrné složky začínající v počáteční hodnotě a klesající k nule

Průběh zkratového proudu pro elektricky vzdálený zkrat je znázorněn na Obrázku 3.6.

Jedná-li se o blízký zkrat, představuje zkratový proud součet následujících dvou složek:

- střídavé složky se zmenšující se amplitudou během zkratu
- stejnosměrné složky začínající v počáteční hodnotě a klesající k nule

Průběh zkratového proudu pro elektricky blízký zkratu je uveden na Obrázku 3.7.

Jak již bylo výše zmíněno je pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

4.5.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

Za normálních okolností je $\underline{Z}_{(0)}$ větší než $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, pak největší počáteční souměrný rázový zkratový proud se vyskytne u trojfázového zkratu. Ovšem může nastat situace, že $\underline{Z}_{(0)}$ je menší než $\underline{Z}_{(1)}$, potom nejvyšší počáteční zkratový proud se vyskytne u dvoufázového zemního zkratu.

Trojfázový zkrat

Výpočet trojfázového zkratu I_k'' se provádí dle následující rovnice 4.15 se zavedením napětí ekvivalentního napětíového zdroje $cU_n/\sqrt{3}$ se součinitelem c podle Tabulky 4.1.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (4.15)$$

Prvky nacházející se za transformátorem v soustavě, ve které nastane zkrat, je nutné jejich impedance přepočítat pomocí druhé mocniny jmenovitého převodu transformátoru. Po přepočtu je možné odpory prvků R_k menší než $0,3 \cdot X_k$ zanedbat.

Dvoufázový zkrat

Pro dvoufázový zkrat I''_{k2} se počáteční souměrný rázový zkratový proud vypočítá následovně:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_k \quad (4.16)$$

Zjednodušení $2 \cdot |\underline{Z}_{(1)}|$ v rovnici 4.16 lze zavést, protože v počátku zkratu jsou si sousledná a zpětná složka zkratové impedance téměř rovny.

Dvoufázový zemní zkrat

Ve výpočtu počátečního souměrného rázového zkratového proudu je nutno rozlišit proudy zkratovaných fází I''_{k2EL2} , I''_{k2EL3} a proud, který prochází zemí I''_{kELE} .

$$I''_{k2EL2} = -jcU_n \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)} - a\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (4.19)$$

$$I''_{k2EL3} = -jcU_n \cdot \frac{\underline{Z}_{(0)} - a^2 \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (4.20)$$

$$I''_{k2E} = -\frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (4.21)$$

Přibližná rovnost $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ platí pro elektricky vzdálený zkrat. Jestliže platí zároveň, že $\underline{Z}_{(0)}$ je menší než $\underline{Z}_{(2)}$, proud, procházející zemí I''_{kELE} dosahuje při mezifázovém zkratu se zemí nejvyšších hodnot ze všech počátečních souměrných rázových proudů.

Jednofázový zkrat

Nebo také v soustavě s izolovaným uzlem nazývaný zemním spojením, se počáteční souměrný rázový zkratový proud vypočítá podle:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (4.17)$$

Opět zavedeme zjednodušení rovnosti $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ pro elektricky vzdálený zkrat a potom platí:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (4.18)$$

4.5.3 Nárazový zkratový proud i_p

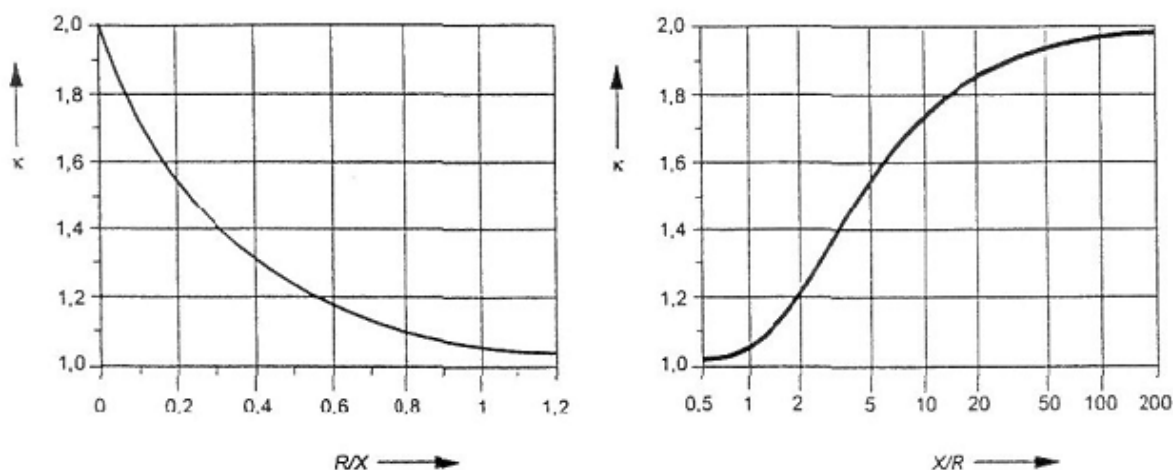
Príspevky nárazového zkratového proudu pro trojfázové zkraty z nezaúhlených sítí, lze vyjádřit takto:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (4.19)$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R se určí výpočtem nebo odečtem z níže uvedeného Obrázku 4.4:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (4.20)$$

Použitím těchto rovnic se předpokládá, že zkrat vznikne při průchodu napětí nulou a že hodnoty nárazového zkratového proudu se dosáhne přibližně po polovině prvního cyklu. [3]



Obrázek 4.4 Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R [3]

4.5.4 Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}

Důležitý proud pro dimenzování elektrických zařízení z hlediska tepelných účinků zkratových proudů. Vztah pro výpočet ekvivalentního oteplovací proud je:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (4.21)$$

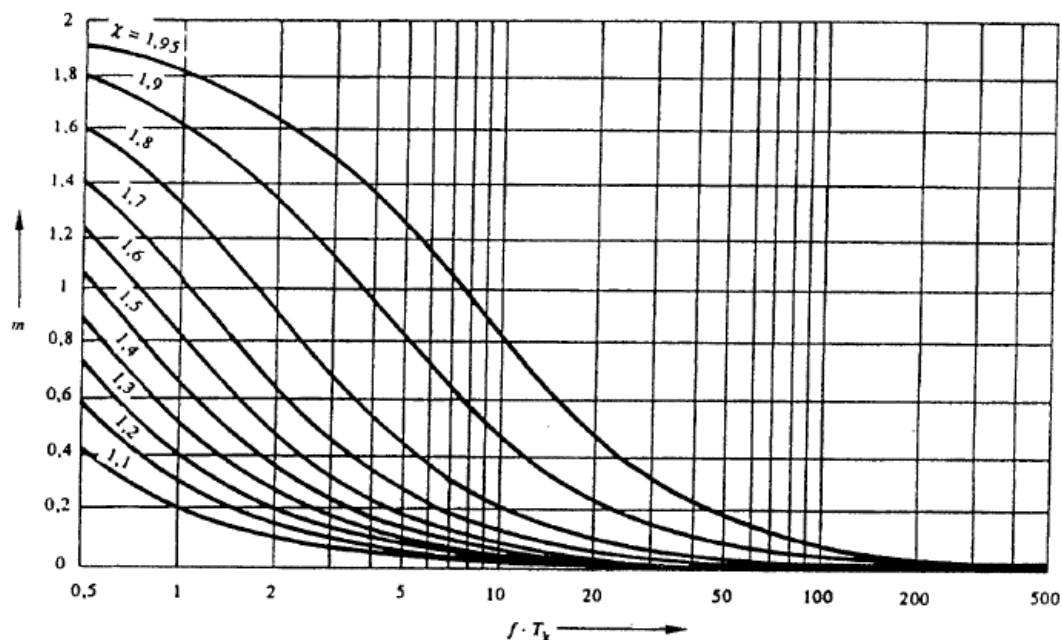
kde: m je součinitel pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu
 n součinitel pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

V distribučních sítích (elektricky vzdálených zkratů) se může použít $n = 1$. Nebo jej lze získat z Obrázku 4.6. Také je možné s ohledem na dobu trvání zkratu 0,5 s nebo větší uvažovat $m+n=1$.

Součinitel m je možné získat dvěma způsoby výpočtem nebo, tak jako součinitel n , z níže uvedeného Obrázku 4.5. Výpočet by vypadal takto:

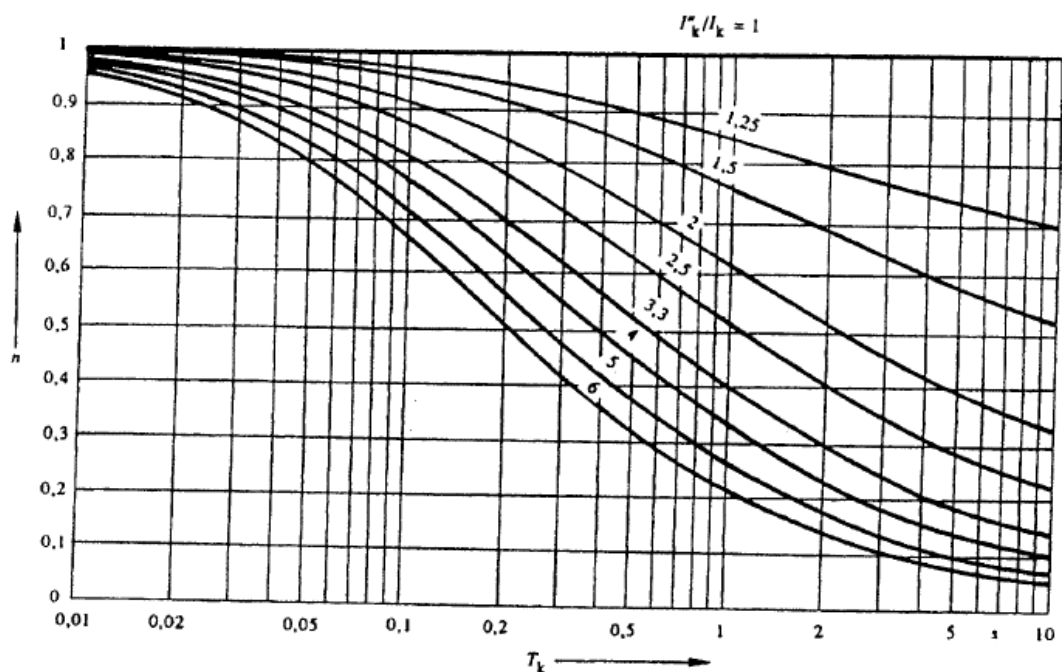
$$m = \frac{1}{2fT_k \cdot \ln(\kappa - 1)} [e^{4fT_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1] \quad (4.22)$$

Součinitel m lze z odrážku získat použitím soušinu $f \cdot T_{ki}$ a součinitele κ určeného výpočtem dle rovnice 4.20.



Obrázek 4.5 Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu

Součinitel n z obrázku zjistíme použitím T_{ki} a podílu I_k''/I_{ki} kde I_{ki} je ustálený zkratový proud pro každý zkrat.



Obrázek 4.6 Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

4.5.5 Minimální průřez S_{\min}

S ohledem na tepelné účinky, kterým musí vodiče odolávat, se pomocí ekvivalentního oteplovacího proudu vypočteného dle rovnice 4.21, vypočte minimální průřez vodiče. Výsledný minimální průřez, je doporučený průřez pro daný vodič. Minimální průřez je definován vztahem: [7]

$$S_{\min} = I_{\text{th}} \cdot \frac{\sqrt{t_k}}{K} \quad (4.23)$$

kde: I_{th} je ekvivalentní oteplovací proud
 t_k doba trvání zkratu
 K koeficient, respektující teplotu jádra kabelu a po zkratu

Koeficient K lze získat z Tabulky 4.2, která je uvedena v normě [8].

Tabulka 4.2 Hodnoty koeficientu K pro vodiče

Vlastnosti/ podmínky	Druh izolace vodiče					
	PVC termoplastický		PVC termoplastický 90 °C		EPR XLPE termoset	Pryž 60 °C termoset
Průřez vodiče, mm ²	≤ 300	> 300	≤ 300	> 300		
Počáteční teplota °C	70		90		90	60
Konečná teplota °C	160	140	160	140	250	200
Materiál vodiče:						
měď	115	103	100	86	143	141
hliník	76	68	66	57	94	93

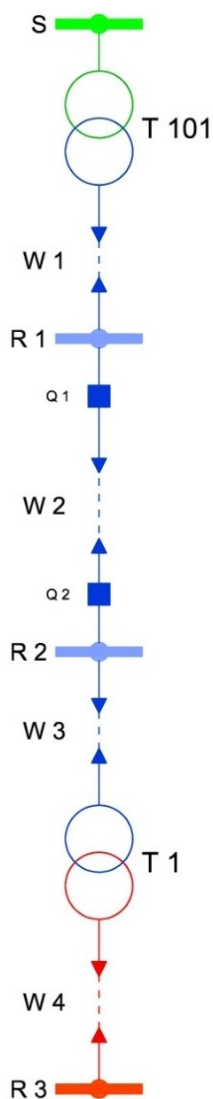
Vypočtený minimální průřez se porovná s průřezem navrženého vodiče. Pokud platí podmínka $S_{\min} \leq S$ potom vodič této podmínce, naopak jestliže podmínka platit nebude, je nutné zvolit vodič s větším průřezem nebo navrhnout paralelní vedení.

5 Softwarová aplikace Zkratý

První a nejdůležitější otázkou byla volba, v jakém prostředí aplikaci navrhnout. Jelikož cílem bylo dosáhnout co možná největšího rozsahu dostupnosti, a to s minimálními finančními náklady, v nejlepším případě nulovými, bylo k vytvoření této aplikace využito programového prostředí známého softwaru Excel od firmy Microsoft. Ve své podstatě se jedná o tabulkový systém, který je všem dostupný, lehce ovladatelný a přehledný.

Tímto směrem se ubírala rovněž aplikace Zkratý. Smyslem bylo vytvořit jednodušší schéma sítě umožňující rychlé orientační ověření výsledků při návrhu kabelových tras a rozvaděčů s ohledem na to, zda vydrží případné zkratové proudy, které by měly skrze ně projít. Výpočty je možné provést i v situaci kdy nejsou známy parametry nadřazené soustavy.

5.1 Popis navrhované sítě



Obrázek 5.1 Schéma navrhované sítě

Síť, jak je možné vidět na Obrázku 5.1, se skládá z nadřazené soustavy S, dvou dvouvinutových transformátorů T 101, T 1, tří rozvaděčů R 1, R 2, R3 a čtyř kabelových vedení W 1, W 2, W 3 a W 4. Tuto síť si lze rozdělit na 3 pomyslné samostatné části, kde rozvaděče R 1 a R 2 tvoří hranici mezi těmito částmi. První z částí obsahuje kabelové vedení W 1, které je ve většině případů považováno za kratší úsek vedení mezi transformátorem T 101 a rozvaděčem R 1, jenž tvoří právě onu hranici. Kdežto smyslem kabelového vedení W 2, tvořícího pomyslnou druhou část, je vytvoření delšího spojovacího vedení mezi dvěma rozvaděči. Funkcí kabelů W 3 a W 4 je opět kratší spoj mezi rozvaděči a transformátorem T 1.

Pomocí barevného rozdělení schématu, se můžeme snadněji a přehledně orientovat v rozlišení různých napěťových hladin.

5.2 Vstupní data

K dosažení zdárného výsledku je zapotřebí v první řadě vyplnit veškerá základní data, bez kterých aplikace není schopna provést jakékoli výpočty. K tomuto účelu slouží první list s názvem *Vstupní data*. Jestliže dojde při vyplňování ke špatnému zadání jakékoliv hodnoty, program upozorní na chybu, pomocí hlášek používaných Excelem.

S	Napěťový součinitel c_{min}/c_{max} (-)	1	1,1
	Zkratový výkon soustavy S_k (MVA)	1000	
T 101	Jm. výkon transformátoru S_n (MVA)	63	
	Procentní napětí nakrátko u_k (%)	15,8	
W 1	Typ kabelu	22-AXEKVCE 3x1x240	Místo zkratu
	Délka l (km)	0,04	Předpokládaný čas vypnutí t_k (s)
	Tvar uložení vodičů	Vedle sebe v zemi	Čas vypnutí zkratu T_k (s)
	Počet paralelních kabelů	1	
KABEL VYHOVUJE Z HLEDISKA MINIMÁLNÍHO PRŮŘEZU			
R 1	Napěťový součinitel c_{min}/c_{max} (-)	1	1,1
	Max. zkratový proud $I''_{k max}$ (kA)	7,97	Vypočtený $I_{k 1s}$ (kA)
	Min. zkratový proud $I''_{k min}$ (kA)	6,45	Vypočtený i_p (kA)
	Místo zkratu	Za transformátorem vn/vn nebo vn/nn	I_{kp} rozvaděče (kA)
			i_p rozvaděče (kA)
ROZVADĚČ VYHOVUJE Z HLEDISKA ZKRATOVÝCH POMĚRŮ			

Obrázek 5.2 Názorný výstřih z listu *Vstupní data*

Na obrázku 5.2 je názorný výstřih z listu *Vstupní data*, se zadáváním hodnot pro nadřazenou soustavu S, transformátor T 101, kabelové vedení W 1 a rozvaděč R 1. V rámci nadřazené soustavy zadáváme její zkratový výkon S_k (MVA) a napěťový součinitel c (-), který se ovšem vyplní do vzorců automaticky po zadání napěťové hladiny pro soustavu a s ohledem na minimální či maximální počáteční rázový zkratový proud.

V případě transformátoru T 101 se doplní jen jeho jmenovitý výkon S_n (MVA) a procentní napětí nakrátko u_k (%). Transformátor T 1, lze vybrat z vytvořeného seznamu s možností zadání vlastního typu. Výkon a napětí nakrátko se doplní z předem vytvořené tabulky.

Předem vytvořené tabulky vznikly také pro kabelová vedení. V tabulkách proběhne vyhledávání hodnot kabelů udávaných na kilometr délky, jako je odpor R_k (Ω /km), reaktance X_k (Ω /km) a indukčnost L_k (mH/km), která je, od napěťové hladiny 6 kV, závislá na tvaru uložení vedení. Pro kabely do hladiny 6 kV se navolí možnost *Tří a více žilové*. Dále se zadávají parametry jako je délka l (km), nutno zadat

pouze v kilometrech. V neposlední řadě se udávají časy a místa zkratu pro výpočty ekvivalentního oteplovacího proudu a minimálního průřezu. Předpokládaný čas vypnutí T_k (s) je časový údaj pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu a čas vypnutí t_k (s) pro výpočet minimálního průřezu. V kapitole 5.4 jsou uvedeny vzorce, se kterými aplikace počítá.

Napěťový součinitel c se objevuje znovu v rámci údajů pro rozvaděče. Jak už bylo zmíněno, určí se automaticky v souvislosti s napěťovou hladinou, kterou je nutno zvolit s ohledem na napěťové hladiny transformátorů. Obsahem dalších buněk jsou jen průběžné výsledky pro přehlednost a urychlení práce, aby nebylo nutné nahlížet do listu *Závěrečná zpráva*.

Výše popsané údaje se analogicky určují i u ostatních částí sítě.

5.3 Tabulky

Po vyplnění některých vstupních dat se v jejich návaznosti automaticky vyplní doplňující hodnoty pro výpočty. Pro jednodušší a rychlejší vyhledávání těchto dat byly vytvořeny tabulky, které se nachází v listu s názvem *Tabulky*.

Spojivosti mezi zadávanými hodnotami a hodnotami z tabulek jsou vytvořeny pomocí logických funkcí zahrnutých v softwaru Excel. Nejčastěji využívaná funkce pro vyhledávání v listu *Tabulky* je funkce typu SVYHLEDAT. Logika SVYHLEDAT tkví ve vyhledávání hodnoty z předem připravené tabulky např. napětí nakrátko u_k pro jakýkoli vybraný typ transformátoru, který lze vybrat ze seznamu. Tabulka musí být seřazena vzestupně čili název transformátoru musí být napsán v prvním sloupci a zbytek tabulky se musí rozvíjet směrem vpravo od sloupce. Posléze se do funkce uvede číslo sloupce, jak je možné vidět na obrázku 5.3, ve kterém má vyhledávání pro daný typ kabelu v daném řádku proběhnout.

Číslo sloupce	1	2	3	4
	Typ transformátoru	Jmenovitý výkon S_n (kVA)	Jmenovitý výkon S_n (MVA)	Napětí na krátko u_k (%)
	Převod 22;10;6/0,4			
	DOTEL 50H/20	50	0,05	4
	DOTEL 100H/21	100	0,1	4
	DOTEL 160H/22	160	0,16	4

Obrázek 5.3 Názorný výstřižek z listu *Tabulky*

Najdeme zde taky tabulku získanou z normy [8] např. pro koeficient K pro výpočet minimálního průřezu vedení.

Údaje o hodnotách pro sestavení tabulek a seznamů s typy kabelů a transformátorů byly odečteny z veřejně přístupných katalogových listů [9] [10] [11] [12] [13] a internetových stránek [14] výrobců.

5.4 Výpočty

Nedílnou součástí celého programu jsou *Výpočty*. Zde jsou sepsány dílčí a celkové vzorce klíčové pro dosažení správných výsledků, popřípadě i s podmínkami jejich užití.

Výše uvedená kapitola 5.2 popisuje získávání dat nezbytných pro jejich dosazení do níže uvedených vzorců viz [15].

5.4.1 Základní vztahy pro výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách**Počáteční rázový zkratový proud I_{k3}'' při trojfázovém zkratu**

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} \quad (\text{kA}) \quad (5.1)$$

Počáteční rázový zkratový proud I_{k2}'' při dvoufázovém zkratu

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} \quad (\text{kA}) \quad (5.2)$$

Nárazový zkratový proud i_p

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3}'' \quad (\text{kA}) \quad (5.3)$$

Vzorec pro výpočet součinitele κ :

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (-) \quad (5.4)$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}

$$I_{th} = I_{k3}'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (\text{kA}) \quad (5.5)$$

Minimální průřez S_{min}

$$S_{min} = I_{th} \cdot \frac{\sqrt{t_k}}{K} \quad (\text{mm}^2) \quad (5.6)$$

5.4.2 Výpočet sousledných parametrů prvků soustavy ve fyzikálních jednotkách**Soustava**

$$Z_{(1)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} \quad (\Omega) \quad (5.7)$$

Dvouvinut'ové transformátory

$$Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad (\Omega) \quad (5.8)$$

Vedení

$$X_{(1)} = X_k \cdot l \quad (\Omega) \quad (5.9)$$

$$R_{(1)} = R_k \cdot l \quad (\Omega) \quad (5.10)$$

kde X_k vypočteme z následujícího vzorce dle

$$X_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \quad (\Omega/\text{km}) \quad (5.11)$$

Přepočet odporů vedení pro minimální zkratový proud $I_{k\min}''$ dle [3]

$$R_{\min} = [1 + \alpha \cdot (\vartheta_{\max} - 20)] \cdot R_{20} \quad (5.12)$$

Přepočet parametrů prvků na hladinu zkratu

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (\Omega) \quad (5.13)$$

Výpočet celkové impedance

$$|Z_{(1)}| = \sqrt{R_{(1)}^2 + X_{(1)}^2} \quad (5.14)$$

Buňky v listu *Vstupní data* obsahující texty *KABEL VYHOVUJE/NEVYHOVUJE Z HLEDISKA MINIMÁLNÍHO PRŮŘEZU* a *ROZVADĚČ VYHOVUJE/NEVYHOVUJE Z HLEDISKA ZKRATOVÝCH POMĚRŮ* jsou vytvořeny pomocí integrované funkce KDYŽ. Smyslem funkce KDYŽ je rozhodnutí pravdivosti tvrzení na základě nějaké podmínky.

Například v případě posouzení zkratové odolnosti rozvaděče, probíhá vyhodnocování na základě čtyř hodnot proudu. K vzájemnému porovnání dochází mezi hodnotami vypočteného ekvivalentního oteplovacího proudu I_{th} pro rozvaděč s I_{cw} , krátkodobým výdržným proudem, udávaným výrobcem rozvaděče a nárazovým zkratovým proudem i_p vypočteného s proudem udávaným od výrobce. Jestliže nastane situace, kdy jeden z proudů, které udává výrobce, nebude znám, rozhodnutí se i přes tento případ s vhodnou kombinací funkce KDYŽ dokončí.

5.5 Výstupní zpráva

Výstupní zpráva je tvořena dvěma listy. Úvodním, který tvoří formální stránku zprávy a listem obsahujícím výsledky.

V prvním, výše uvedeném tzv. *Úvodním listu*, se nacházejí údaje jako např. název a místo provádění akce, stupeň vypracování dokumentace, kdo je investor projektu a v neposlední řadě autor projektu.

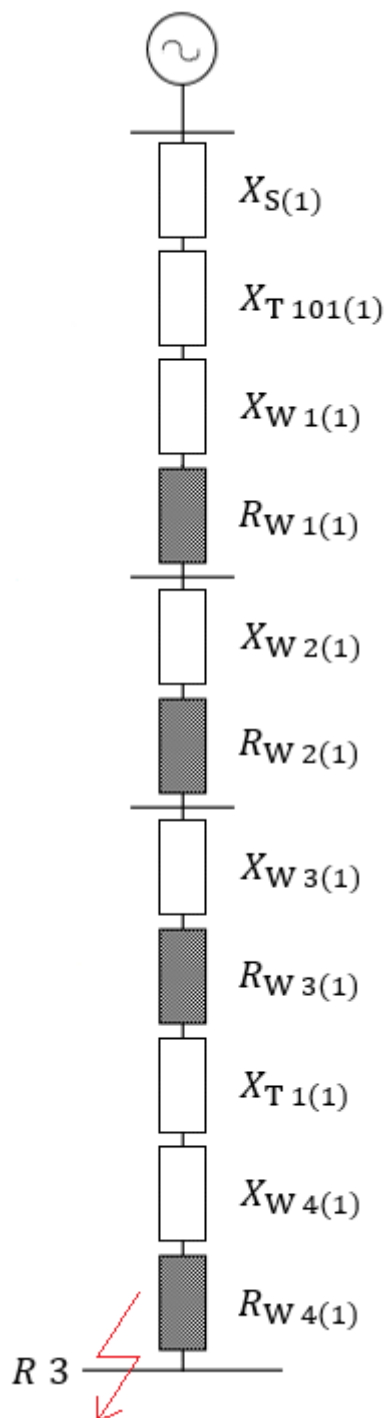
Druhý list, s názvem *Výsledky*, znázorňuje souhrn pro uživatele podstatných výsledků. Uvedeny jsou jen výsledky proudů, Pro lepší orientaci a přehlednost je zde uvedeno schéma sítě a barevné rozdělení.

Výstupní zprávu si lze jako celek vytisknout. Vzorový náhled, jak pro samotnou *Výstupní zprávu*, tak i pro celkovou představu aplikace, je níže uveden v přílohách práce.

Výpočtová aplikace jako taková byla vytvořena pro vnitřní použití v rámci společnosti Q-ELEKTRIK a.s. Společností bylo také poskytnuto podkladové schéma sítě. Sloužit bude pro orientační výpočty zkratových proudů při návrhu kabelových tras a rozvaděčů.

6 Výpočet zkratových poměrů

Pro ověření správnosti výpočtů vytvořené softwarové aplikace bude proveden kontrolní ruční výpočet navržené soustavy. Sít se skládá z nadřazené soustavy S dvěma transformátory T 101 s napětovými hladinami 110/22 kV a T 1 22/0,4 kV, třemi rozvaděči R 1, R 2, R 3 a čtyř kabelových vedení W 1, W 2, W 3 a W 4. Pro názornější ukázkou výpočtů je zvolen zkrat na nejnižší úrovni R 3, v tomto případě napětové hladině 0,4 kV.



Obrázek 6.1 Náhradní schéma pro výpočet maximálního zkratového proudu

6.1 Výpočet maximálního zkratového proudu

K výše uvedenému schématu se provede výpočet hodnot reaktancí a odporů dílčích prvků sítě a z nich následně celková náhradní impedanci zkratového obvodu. K tomu využijeme vzorce uvedené v kapitole 5.4 případně viz případně viz [15]. Napěťový součinitel pro maximální zkratový proud bude c_{\max} viz Tabulka 4.1.

Náhradní impedance zkratového obvodu

Nadřazená soustava

$$X_{S(1)} = \frac{c_{\max} \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{1000} = 13,310 \, \Omega \quad (6.1)$$

Transformátory

Transformátor T 101

$$X_{T101(1)} = \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT101}} = \frac{15,8 \cdot 22^2}{100 \cdot 63} = 1,214 \, \Omega \quad (6.2)$$

Transformátor T 1

$$X_{T1(1)} = \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT1}} = \frac{4 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,63} = 10,159 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.3)$$

Kabelové vedení

Parametry kabelů byly odečteny z katalogů [9] [10] [11] [12] [13].

Tabulka 6.1 Parametry kabelů

Typ	Značení	S (mm ²)	l (km)	R _k (Ω/km)	L _k (mH/km)	X _k (mΩ/km)
22-AXEKVCE	W 1	3x1x240	0,04	0,125	0,56	175,93
22-AXEKVCE	W 2	3x1x120	2,5	0,253	0,39	122,52
22-AXEKVCE	W 3	3x1x120	0,05	0,253	0,64	201,06
1-AYKY	W 4	3x240+120	0,1	0,125	0,22	69,115

Příklad výpočtu reaktance X_{kW1} dle vzorce 5.11

$$X_{kW1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{kW1} \quad (6.4)$$

$$X_{kW1} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,56 \quad (6.5)$$

$$X_{kW1} = 175,93 \cdot 10^{-3} \, (\Omega/\text{km}) \quad (6.6)$$

Kabelové vedení W 1

$$X_{W1(1)} = X_{kW1} \cdot l_{W1} = 175,93 \cdot 10^{-3} \cdot 0,040 = 7,037 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.7)$$

$$R_{W1(1)} = R_{kW1} \cdot l_{W1} = 125 \cdot 10^{-3} \cdot 0,040 = 5 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.8)$$

Kabelové vedení W 2

$$X_{W2(1)} = X_{kW2} \cdot l_{W2} = 122,52 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 = 306,3 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.9)$$

$$R_{W2(1)} = R_{kW2} \cdot l_{W2} = 253 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 = 632,5 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.10)$$

Kabelové vedení W 3

$$X_{W3(1)} = X_{kW3} \cdot l_{W3} = 201,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,050 = 10,053 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.11)$$

$$R_{W3(1)} = R_{kW3} \cdot l_{W3} = 253 \cdot 10^{-3} \cdot 0,050 = 12,65 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.12)$$

Kabelové vedení W 4

$$X_{W4(1)} = X_{kW4} \cdot l_{W4} = 69,115 \cdot 10^{-3} \cdot 0,100 = 6,912 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.13)$$

$$R_{W4(1)} = R_{kW4} \cdot l_{W4} = 125 \cdot 10^{-3} \cdot 0,100 = 12,50 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.14)$$

Jelikož zde nastal zkrat v úrovni rozvaděče R 3 na napěťové hladině 0,4 kV je nutné reaktance a odpory přepočítat na hladinu zkratu dle vzorce 5.13. Přepočet se nebude dělat v případech transformátoru T 1 a kabelového vedení W 4, protože tyto prvky jsou počítány už na hladině zkratu.

Přepočet na hladinu zkratu 0,4 kV

Nadřazená soustava

$$X_{S0,4(1)} = X_{S(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{110}} \right)^2 = 13,310 \cdot \left(\frac{0,4}{110} \right)^2 = 1,76 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.15)$$

Transformátor

Transformátor T 101

$$X_{T1010,4(1)} = X_{T101(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}} \right)^2 = 1,214 \cdot \left(\frac{0,4}{22} \right)^2 = 4,013 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (6.16)$$

Transformátor **T 1**

$$X_{T1\ 0,4(1)} = X_{T1(1)} = 10,159 \cdot 10^{-3} \ \Omega \quad (6.17)$$

Kabelové vedení

Kabelové vedení **W 1**

$$X_{W1\ 0,4(1)} = X_{W1(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}}\right)^2 = 7,037 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 2,326 \cdot 10^{-6} \ \Omega \quad (6.18)$$

$$R_{W1\ 0,4(1)} = R_{W1(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}}\right)^2 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 1,653 \cdot 10^{-6} \ \Omega \quad (6.19)$$

Kabelové vedení **W 2**

$$X_{W2\ 0,4(1)} = X_{W2(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}}\right)^2 = 306,31 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 1,013 \cdot 10^{-4} \ \Omega \quad (6.20)$$

$$R_{W2\ 0,4(1)} = R_{W2(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}}\right)^2 = 632,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 2,091 \cdot 10^{-4} \ \Omega \quad (6.21)$$

Kabelové vedení **W 3**

$$X_{W3\ 0,4(1)} = X_{W3(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}}\right)^2 = 10,053 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 3,323 \cdot 10^{-6} \ \Omega \quad (6.22)$$

$$R_{W3\ 0,4(1)} = R_{W3(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{22}}\right)^2 = 12,65 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,4}{22}\right)^2 = 4,182 \cdot 10^{-6} \ \Omega \quad (6.23)$$

Kabelové vedení **W 4**

$$X_{W4\ 0,4(1)} = X_{W4(1)} = 6,912 \cdot 10^{-3} \ \Omega \quad (6.24)$$

$$R_{W4\ 0,4(1)} = R_{W4(1)} = 12,50 \cdot 10^{-3} \ \Omega \quad (6.25)$$

Nyní se pomocí vypočtených reaktancí a odporů prvků vypočte celková náhradní impedance pro zkrat v rozvaděči R 3 na hladině 0,4 kV.

Celková náhradní impedance

Celková reaktance $X_{C0,4(1)}$

$$\begin{aligned} X_{C0,4(1)} = & X_{S0,4(1)} + X_{T101\ 0,4(1)} + X_{W1\ 0,4(1)} + X_{W2\ 0,4(1)} + X_{W3\ 0,4(1)} \\ & + X_{T1\ 0,4(1)} + X_{W4\ 0,4(1)} \end{aligned} \quad (6.26)$$

$$X_{C0,4(1)} = 1,76 \cdot 10^{-3} + 4,013 \cdot 10^{-4} + 2,326 \cdot 10^{-6} + 1,013 \cdot 10^{-4} + 3,323 \cdot 10^{-6} + 10,159 \cdot 10^{-3} + 6,912 \cdot 10^{-3} \quad (6.27)$$

$$X_{C0,4(1)} = 19,339 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.28)$$

Celkový odpor $R_{C0,4(1)}$

$$R_{C0,4(1)} = R_{W1\ 0,4(1)} + R_{W2\ 0,4(1)} + R_{W3\ 0,4(1)} + R_{W4\ 0,4(1)} \quad (6.29)$$

$$R_{C0,4(1)} = 1,653 \cdot 10^{-6} + 2,091 \cdot 10^{-4} + 4,182 \cdot 10^{-6} + 12,50 \cdot 10^{-3} \quad (6.2)$$

$$R_{C0,4(1)} = 12,715 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.31)$$

Celková náhradní impedance $|Z_{C0,4(1)}|$

$$|Z_{C0,4(1)}| = \sqrt{R_{C0,4(1)}^2 + X_{C0,4(1)}^2} \quad (6.32)$$

$$|Z_{C0,4(1)}| = \sqrt{(12,715 \cdot 10^{-3})^2 + (19,339 \cdot 10^{-3})^2} \quad (6.33)$$

$$|Z_{C0,4(1)}| = 23,145 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.3)$$

Maximální zkratový proud $I''_{k3\ maxR\ 3}$

$$I''_{k3\ maxR\ 3} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{C0,4(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot |21,838 \cdot 10^{-3}|} = 10,98\ kA \quad (6.35)$$

Výsledek v aplikaci Zkraty

$$I''_{k3\ maxR\ 3} = 10,58\ kA \quad (6.36)$$

Ekvivalentní oteplovací proud $I_{thR\ 3}$ pro čas vypnutí $T_k=1s$

$$I_{thR\ 3} = \sqrt{m + n} \cdot I''_{k3\ maxR\ 3} \quad (6.37)$$

$$n = 1 \quad (6.38)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (6.39)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{12,715 \cdot 10^{-3}}{17,754 \cdot 10^{-3}}} \quad (6.40)$$

$$\kappa = 1,156 \quad (6.41)$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1] \quad (6.42)$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 1 \cdot \ln(1,156 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 1 \cdot \ln(1,156 - 1)} - 1] \quad (6.43)$$

$$m = 17,941 \cdot 10^{-3} \quad (6.44)$$

$$I_{thR3} = \sqrt{17,941 \cdot 10^{-3} + 1} \cdot 10,98 \quad (6.45)$$

$$I_{thR3} = 11,09 \text{ kA} \quad (6.46)$$

Výsledek v aplikaci Zkraty

$$I_{thR3} = 10,58 \text{ kA} \quad (6.47)$$

Nárazový zkratový proud i_{pR3}

$$i_{pR3} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3 \max}'' \quad (6.48)$$

$$i_{pR3} = 1,156 \cdot \sqrt{2} \cdot 10,98 \quad (6.49)$$

$$i_{pR3} = 18,95 \text{ kA} \quad (6.50)$$

Výsledek v aplikaci Zkraty

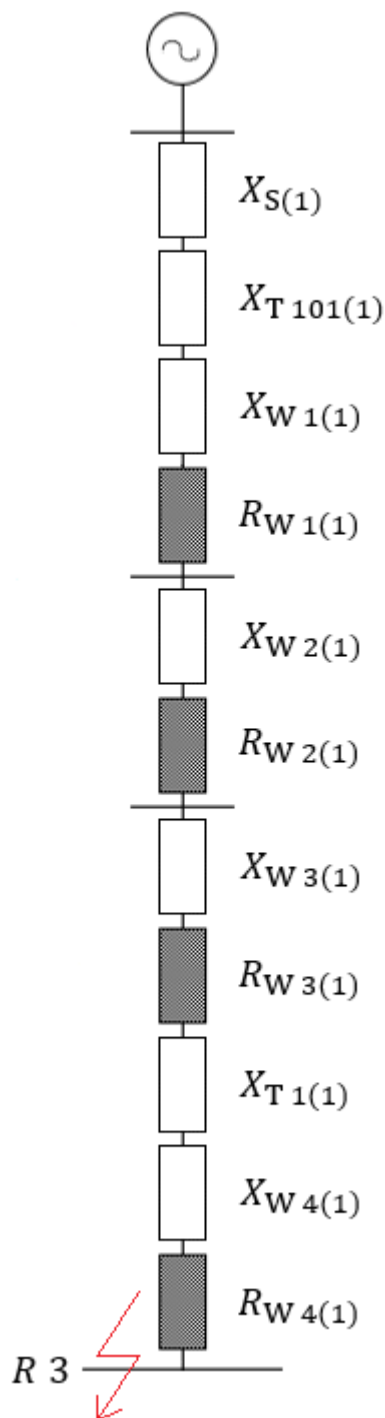
$$i_{pR3} = 19,44 \text{ kA} \quad (6.51)$$

Tabulka 6.2 Přehled výsledků vypočtených proudů $I_{k3 \max}''$, I_{th} , i_p

Místo zkratu	$I_{k3 \max}''$ (kA)	I_{th} (kA)	i_p (kA)
Transformátor T 101	8,00	-	-
Rozvaděč R 1	7,97	8,13	19,16
Rozvaděč R 2	6,48	6,55	14,66
Transformátor T 1	21,72	-	-
Rozvaděč R 3	10,58	10,58	19,44

6.2 Výpočet minimálního zkratového proudu

V tomto případě náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu bude totožné s náhradním schématem pro výpočet maximálního zkratového proudu. V této konfiguraci soustavy se neuvažují příspěvky z elektráren či motorů. Nelze ovšem zanedbat změnu odporu kabelových vedení v soustavě, které budou přepočítány dle vzorce 4.1. Počítat se také bude s jiným napěťovým činitelem, a to s c_{\min} viz Tabulka 4.1.



Obrázek 6.2 Náhradní schéma pro výpočet minimálního zkratového proudu

Nadřazená soustava

$$X_{Sm(1)} = \frac{c_{\min} \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1 \cdot 110^2}{1000} = 12,1 \, \Omega \quad (6.52)$$

Reaktance přepočtena na hladinu zkratu

$$X_{Smin(1)} = X_{Sm(1)} \cdot \left(\frac{U_{0,4}}{U_{110}} \right)^2 = 12,1 \cdot \left(\frac{0,4}{110} \right)^2 = 1,6 \cdot 10^{-4} \, \Omega \quad (6.53)$$

Transformátory

Transformátor **T 101**

$$X_{T 101min(1)} = X_{T 101 0,4(1)} = 4,013 \cdot 10^{-4} \, \Omega \quad (6.54)$$

Transformátor **T 1**

$$X_{T 1min(1)} = X_{T 1 0,4(1)} = 10,159 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.55)$$

Kabelové vedení

Kabelové vedení **W 1**

$$X_{W1min(1)} = X_{W 10,4(1)} = 2,326 \cdot 10^{-6} \, \Omega \quad (6.56)$$

Pro přepočet odporů kabelových vedení použijeme již zmíněný vzorec 4.1 kapitola 4.2.2. Ve vzorci je zahrnuta maximální dovolená teplota při zkratu, která je uvedena v katalogových listech kabelů [9] [10] [11] [12] [13]. V následující tabulce jsou uvedeny maximální dovolené teploty pro tento příklad.

$$R_{Wmin} = [1 + \alpha \cdot (\vartheta_{\max} - 20)] \cdot R_{W 0,4} \quad (6.57)$$

Součinitel α zahrnující typ materiálu jádra vodiče je dle normy [3]:

$$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} K^{-1} \quad (6.58)$$

Tabulka 6.3 Hodnoty maximálních dovolených teplot při zkratu

Typ	Značení	S (mm ²)	ϑ_{\max} (°C)
22-AXEKVCE	W 1	3x1x240	250
22-AXEKVCE	W 2	3x1x120	250
22-AXEKVCE	W 3	3x1x120	250
1-AYKY	W 4	3x240+120	160

$$\begin{aligned}
 R_{W1\min(1)} &= [1 + \alpha \cdot (\vartheta_{\max} - 20)] \cdot R_{W1\,0,4(1)} \\
 &= [1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (250 - 20)] \cdot 1,653 \cdot 10^{-6} \\
 &= 3,288 \cdot 10^{-6} \, \Omega
 \end{aligned}
 \tag{6.59}$$

Kabelové vedení **W 2**

$$X_{W2\min(1)} = X_{W2\,0,4(1)} = 1,013 \cdot 10^{-4} \, \Omega \tag{6.60}$$

$$\begin{aligned}
 R_{W2\min(1)} &= [1 + \alpha \cdot (\vartheta_m - 20)] \cdot R_{W2\,0,4(1)} \\
 &= [1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (250 - 20)] \cdot 2,091 \cdot 10^{-4} \\
 &= 4,159 \cdot 10^{-4} \, \Omega
 \end{aligned}
 \tag{6.61}$$

Kabelové vedení **W 3**

$$X_{W3\min(1)} = X_{W3\,0,4(1)} = 3,323 \cdot 10^{-6} \, \Omega \tag{6.62}$$

$$\begin{aligned}
 R_{W3\min(1)} &= [1 + \alpha \cdot (\vartheta_m - 20)] \cdot R_{W3\,0,4(1)} \\
 &= [1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (250 - 20)] \cdot 4,182 \cdot 10^{-6} \\
 &= 8,318 \cdot 10^{-6} \, \Omega
 \end{aligned}
 \tag{6.63}$$

Kabelové vedení **W 4**

$$X_{W4\min(1)} = X_{W4\,0,4(1)} = 6,912 \cdot 10^{-3} \, \Omega \tag{6.64}$$

$$\begin{aligned}
 R_{W4\min(1)} &= [1 + \alpha \cdot (\vartheta_m - 20)] \cdot R_{W4\,0,4(1)} \\
 &= [1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot (160 - 20)] \cdot 12,50 \cdot 10^{-3} \\
 &= 20,025 \cdot 10^{-3} \, \Omega
 \end{aligned}
 \tag{6.65}$$

Celková náhradní impedance

Celková reaktance $X_{C\min(1)}$

$$\begin{aligned}
 X_{C\min(1)} &= X_{S\min(1)} + X_{T101\min(1)} + X_{W1\min(1)} + X_{W2\min(1)} \\
 &\quad + X_{W3\min(1)} + X_{T1\min(1)} + X_{W4\min(1)}
 \end{aligned}
 \tag{6.66}$$

$$\begin{aligned}
 X_{C\min(1)} &= 1,6 \cdot 10^{-4} + 4,013 \cdot 10^{-4} + 2,326 \cdot 10^{-6} + 1,013 \cdot 10^{-4} \\
 &\quad + 3,323 \cdot 10^{-6} + 10,159 \cdot 10^{-3} + 6,912 \cdot 10^{-3}
 \end{aligned}
 \tag{6.67}$$

$$X_{C\min(1)} = 17,739 \cdot 10^{-3} \, \Omega \tag{6.68}$$

Celkový odpor $R_{Cmin(1)}$

$$R_{Cmin(1)} = R_{W1min(1)} + R_{W2min(1)} + R_{W3min(1)} + R_{W4min(1)} \quad (6.69)$$

$$R_{Cmin(1)} = 3,288 \cdot 10^{-6} + 4,159 \cdot 10^{-4} + 8,318 \cdot 10^{-6} + 20,025 \cdot 10^{-3} \quad (6.70)$$

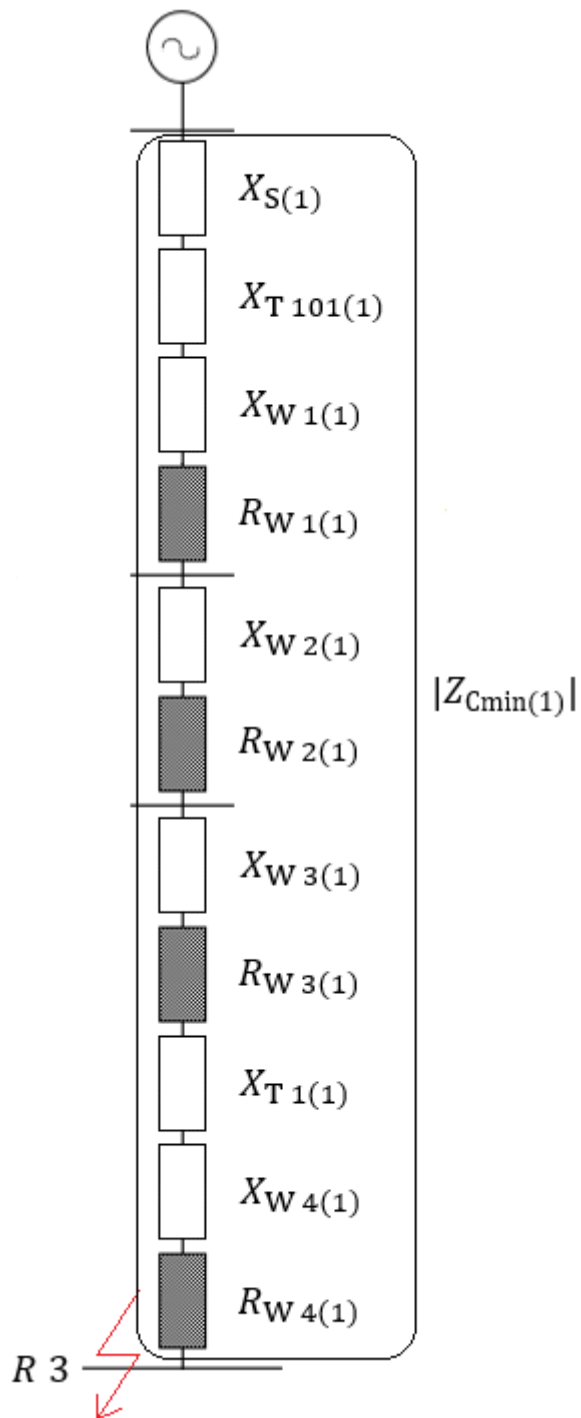
$$R_{Cmin(1)} = 20,453 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.71)$$

Celková náhradní impedance $|Z_{Cmin(1)}|$

$$|Z_{Cmin(1)}| = \sqrt{R_{Cmin(1)}^2 + X_{Cmin(1)}^2} \quad (6.72)$$

$$|Z_{Cmin(1)}| = \sqrt{(17,739 \cdot 10^{-3})^2 + (20,453 \cdot 10^{-3})^2} \quad (6.73)$$

$$|Z_{Cmin(1)}| = 27,074 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.74)$$



Obrázek 6.3 Celková náhradní impedance pro hladinu zkratu 0,4 kV

Minimální zkratový proud $I''_{k2 \min R3}$

$$I''_{k2 \min R3} = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{C(1)}|} = \frac{0,95 \cdot 0,4}{2 \cdot |27,074 \cdot 10^{-3}|} = 7,02 \text{ kA} \quad (6.75)$$

Výsledek v aplikaci Zkraty

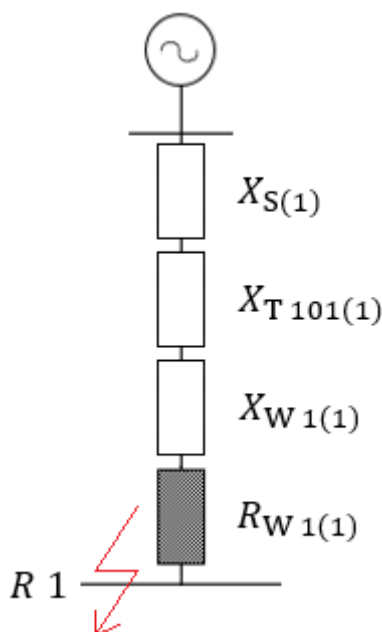
$$I''_{k2 \min R 3} = 7,02 \text{ kA} \quad (6.76)$$

Tabulka 6.4 Přehled výsledků minimálních zkratových proudů $I''_{k2 \min}$

Místo zkratu	$I''_{k2 \min} \text{ (kA)}$
Transformátor T 101	6,48
Rozvaděč R 1	6,45
Rozvaděč R 2	4,63
Transformátor T 1	17,54
Rozvaděč R 3	7,02

6.3 Výpočet minimálního průřezu pro kabelové vedení W 2

Postup pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu a minimálního průřezu na kabelovém vedení je téměř totožný s postupem výpočtu minimálního či maximálního zkratového proudu. Rozdíl je v tom, že se pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu pro kabelové vedení W 2 využije maximálního zkratového proudu, který nastane v úrovni rozvaděče R 1 a ne na samotném kabelovém vedení. Rozvaděč R 1 se nachází na hladině 22 kV.



Obrázek 6.4 Náhradní schéma pro výpočet maximálního zkratového proudu

Nadřazená soustava

$$X_{S(1)} = \frac{c_{\max} \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{1000} = 13,310 \, \Omega \quad (6.77)$$

Transformátor

Transformátor T 101

$$X_{T101(1)} = \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_{nT101}} = \frac{15,8 \cdot 22^2}{100 \cdot 63} = 1,214 \, \Omega \quad (6.78)$$

Kabelové vedení W 1

$$X_{W1(1)} = X_{kW1} \cdot l_{W1} = 176,93 \cdot 10^{-3} \cdot 0,040 = 7,037 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.79)$$

$$R_{W1(1)} = R_{kW1} \cdot l_{W1} = 125 \cdot 10^{-3} \cdot 0,040 = 5 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.80)$$

I v této konfiguraci soustavy musí dojít k přepočtu hodnot na hladinu zkratu která je 22 kV. Přepočteny nebudou hodnoty pro transformátor T 101 a kabelového vedení W 1, protože tyto prvky jsou provozovány už na dané hladině.

Přepočet na hladinu zkratu

Nadřazená soustava

$$X_{S22(1)} = X_{S(1)} \cdot \left(\frac{U_{22}}{U_{110}} \right)^2 = 13,310 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 0,5324 \, \Omega \quad (6.81)$$

Transformátor T 101

$$X_{T10122(1)} = X_{T101(1)} = 1,214 \, \Omega \quad (6.82)$$

Kabelové vedení W 1

$$X_{W122(1)} = X_{W1(1)} = 7,037 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.83)$$

$$R_{W122(1)} = R_{W1(1)} = 5 \cdot 10^{-3} \, \Omega \quad (6.84)$$

Celková náhradní impedance

Celková reaktance $X_{C22(1)}$

$$X_{C22(1)} = X_{S22(1)} + X_{T10122(1)} + X_{W122(1)} \quad (6.85)$$

$$X_{C22(1)} = 0,5324 + 1,214 + 7,037 \cdot 10^{-3} \quad (6.86)$$

$$X_{C22(1)} = 1,753 \, \Omega \quad (6.87)$$

Celkový odpor $R_{C22(1)}$

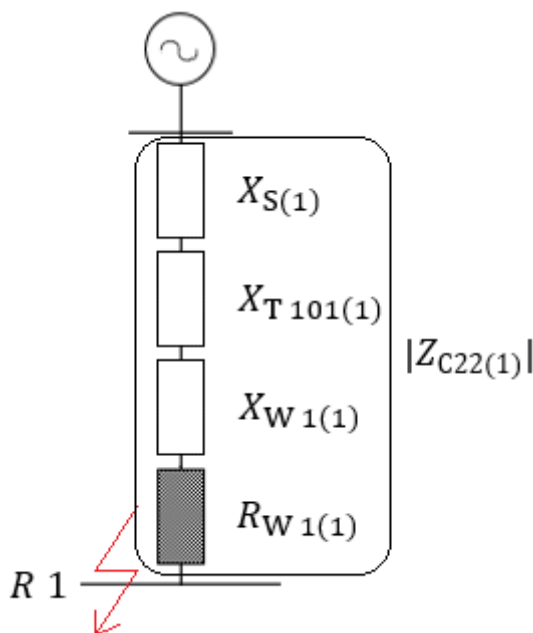
$$R_{C22(1)} = R_{W1\ 22(1)} = 5 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (6.88)$$

Celková náhradní impedance $|Z_{C22(1)}|$

$$|Z_{C22(1)}| = \sqrt{R_{C22(1)}^2 + X_{C22(1)}^2} \quad (6.89)$$

$$|Z_{C22(1)}| = \sqrt{(5 \cdot 10^{-3})^2 + (1,753)^2} \quad (6.90)$$

$$|Z_{C22(1)}| = 1,753 \Omega \quad (6.91)$$



Obrázek 6.5 Celková náhradní impedance pro hadinu zkratu 22 kV

Maximální zkratový proud $I''_{k3\ maxR\ 1}$

$$I''_{k3\ maxR\ 1} = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{C22(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot |1,753|} = 7,97 \text{ kA} \quad (6.92)$$

Výsledek v aplikaci Zkraty

$$I''_{k3\ maxR\ 1} = 7,97 \text{ kA} \quad (6.93)$$

Ekvivalentní oteplovací proud $I_{thW\ 2}$ pro předpokládaný čas vypnutí zkratu T_k

$$I_{thW\ 2} = \sqrt{m + n} \cdot I''_{k3\ maxR\ 1} \quad (6.94)$$

$$n = 1 \quad (6.95)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (6.96)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{632,5 \cdot 10^{-3}}{306,31 \cdot 10^{-3}}} \quad (6.97)$$

$$\kappa = 1,022 \quad (6.98)$$

$$m = \frac{1}{2 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot [e^{4 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1] \quad (6.99)$$

V tomto případě je T_k zvoleno při navrhování soustavy a tedy $T_k=0,5s$.

$$m = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \ln(1,022 - 1)} \cdot [e^{4 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \ln(1,022 - 1)} - 1] \quad (6.100)$$

$$m = 5,24 \cdot 10^{-3} \quad (6.101)$$

$$I_{thW2} = \sqrt{5,24 \cdot 10^{-3} + 1} \cdot 7,97 \quad (6.102)$$

$$I_{thW2} = 8,13 \text{ kA} \quad (6.103)$$

Výsledek v aplikaci Zkratý

$$I_{thW2} = 8,13 \text{ kA} \quad (6.104)$$

Minimální průřez S_{minW2}

$$S_{minW2} = \frac{I_{thW2} \cdot \sqrt{t_k}}{K} \quad (6.105)$$

Čas vypnutí zkratu t_k se opět volí při návrhu soustavy. Součinitel K respektující měrný odpor, teplotní koeficient a tepelnou kapacitu materiálu vodiče, se určí při zvolení typu kabelu v závislosti na materiálu izolace a materiálu jádra vodiče.

Pro kabelové vedení **W 2** je zvolen čas vypnutí zkratu:

$$t_k = 0,8 \text{ s} \quad (6.106)$$

A součinitel K je dle tabulky 4.2 a typu kabelu, v tomto případě 22-AXEKVCE 3x1x120 s hliníkovým jádrem a PVC izolací:

$$K = 76 \quad (6.107)$$

Pak tedy minimální průřez $S_{\min W 2}$ je:

$$S_{\min W 2} = \frac{8,13 \cdot \sqrt{0,8}}{76} = 95,68 \approx 120 \text{ mm}^2 \quad (6.108)$$

Výsledek v aplikaci Zkratý

$$S_{\min W 2} = 95,661 \text{ mm}^2 \quad (6.109)$$

Výsledný minimální průřez se porovnává s průřezem navrhovaného kabelového vedení, zda vydrží případný ekvivalentní zkratový proudy a jeho tepelné účinky, který by skrze něho měl přejít. Pro vedení W 2 byl navrhnut kabel typu 22-AXEKVCE 3x1x120, když provedeme porovnání podle podmínky zmíněné v kapitole 4.5.5:

$$S_{\min W 2} \leq S_{W 2} \quad (6.110)$$

$$120 \leq 120 \quad (6.111)$$

V tomto případě je podmínka dle vzorce 6.104 splněna a můžeme navržený kabel ponechat. Při opačné situaci, kdy by podmínka splněna nebyla je možno průřez kabelu navýšit či použít více paralelních vedení.

Tabulka 6.5 Přehled vypočtených hodnot pro vedení I_{th} a S_{min}

Vedení	I_{th} (kA)	S_{min} (mm ²)
W 1	8,16	107,38
W 2	8,13	95,66
W 3	6,61	67,37
W 4	21,72	156,54

6.4 Zhodnocení výsledků pro uvedené příklady

Odchyšky a nepřesnosti se objevují skoro vždy a všude. Výjimkou nebyl ani tenhle případ. Někde jsou odchyšky větší, projevující se i v řádech jednotek, a někde zase menší, dokonce až tak malé, že je lze zaregistrovat až v desetinných místech.

Největší odchylku ve výsledcích, zobrazených v následující tabulce 6.6, lze spatřit u výpočtu nárazového zkratového proudu $i_{pR\ 3}$ pro rozvaděč R 3. Z tabulky je zřejmé, že se odchylka objevuje již u výpočtů maximálního počátečního rázového zkratového proudu $I''_{k3\ maxR\ 3}$. Jestliže dojde k detailnějšímu prozkoumání výsledků a následnému porovnání výsledků celkových impedancí zkratového obvodu ručním výpočtem $|Z_{C0,4(1)}| = 23,145 \cdot 10^{-3} \Omega$ s výsledkem z aplikace $|Z_{C0,4(1)}| = 21,838 \cdot 10^{-3} \Omega$, je vidět odchylka už i zde. Vznikla totiž už dříve během ručního výpočtu celkové reaktance obvodu. Kde pomocí ručního výpočtu vyšla reaktance $X_{C0,4(1)} = 19,339 \cdot 10^{-3} \Omega$ a v aplikaci vyšla $X_{C0,4(1)} = 17,754 \cdot 10^{-3} \Omega$. Nepřesnost je způsobena zaokrouhlováním na méně desetinných míst, než je možno počítat v jakémkoli softwaru.

Při porovnání minimálních zkratových proudů $I''_{k2\ minR\ 3}$ pro stejné místo je vidět rovnost. Ovšem v případě dvou desetinných míst. Kdyby bylo možné znázornit více desetinných míst projevila by se nerovnost až tam.

Stejně tomu tak je i u výsledku pro kabelové vedení W 2 až na výsledek pro minimální průřez. Opět se jedná o chybu zanesenou zaokrouhlováním. Chyba ovšem není tam markantní jako u prvního příkladu, protože zde není počítáno s tolika prvky a vliv zaokrouhlování se neprojeví až v takovém rozsahu.

Tabulka 6.6 Přehled výsledků uvedených příkladů

Místo výpočtu	Druh veličiny	Ruční výpočet	Aplikace Zkrat
Rozvaděč R 3	$I''_{k3\ maxR\ 3} \text{ (kA)}$	10,98	10,58
	$I_{thR\ 3} \text{ (kA)}$	11,09	10,58
	$i_{pR\ 3} \text{ (kA)}$	18,95	19,44
	$I''_{k2\ minR\ 3} \text{ (kA)}$	7,02	7,02
Vedení W 2	$I''_{k3\ maxR\ 1} \text{ (kA)}$	7,97	7,97
	$I_{thW\ 2} \text{ (kA)}$	8,13	8,13
	$S_{minW\ 2} \text{ (mm}^2\text{)}$	95,68	95,661

Závěr

V tomto oborovém odvětví se s výpočty potýkáme a nadále se s nimi potýkat budeme, ať už zkratových poměrů či jiných. Proto není na škodu si vzájemně vypomoci a ušetřit spoustu času, právě skrze vytváření podobných softwarů v jakémkoli rozsahu např. jako je aplikace vytvořena v rámci této práce.

V úvodu této diplomové práce jsou popsány veškeré teoretické informace a principy, týkající se zkratových proudů a jejich výpočtů, uvedené v normě ČSN 60909-0 a další. Mimo jiné jsou zde popsány také definice základních proudů, druhů zkratů s průběhy a nepříznivými účinky zkratových proudů. Dalšími nezbytnými údaji jsou údaje spojené s metodikou výpočtu a zjednodušujícími předpoklady pro výpočty.

Obsahem další části je popis samotné aplikace Zkraty. Je zde nastíněn princip, jak celá aplikace funguje a k čemu ji lze využít. Podkladem pro její vytvoření bylo vzorové schéma. Dále je popsáno podrobnější rozdělení aplikace pro znázornění jednotlivých částí a jejich významu k čemu jsou určeny. Mezi ně samozřejmě patří i vzorce použité ve výpočtech. Tyto vzorce byly přiřazeny ke konkrétním prvkům sítě a uplatněny nejen v aplikaci, ale také v další a zároveň poslední kapitole.

Již zmíněna poslední část se zabývá názornou aplikací vzorců a jejich výpočtu zkratových poměrů. Cílem uvedených příkladů je co možná nejpodrobněji předvést celý výpočetní cyklus, na kterém aplikace pracuje. Hlavními výstupy jsou hodnoty počátečních rázových zkratových proudů, nárazových zkratových proudů, ekvivalentních oteplovacích proudů a v neposlední řadě minimálních průřezů. Na základě těchto hodnot se provádí kontrola, zda je síť správně navržena.

S použitím této aplikace se zkrátí čas výpočtu a eliminují se eventuální chyby, které mohou vzniknout při ručním výpočtu hodnot a jejich zaokrouhlování. Přestože zaokrouhlování zjednodušuje a urychluje práci s čísly, patří mezi jednu z nečastějších příčin vzniku odchylek. Je totiž velkým rozdílem, zda zaokrouhlíte už první vypočtenou hodnotu na určitý počet míst anebo na stejný počet míst hodnotu vypočtenou jako poslední.

Použitá literatura

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk; TŮMA, Jiří. Řízení elektrizačních soustav. II. vydání. Praha : ČVUT Praha, 1990.
- [2] Fencel F.: *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*, ČVUT, Praha, 2003
- [3] ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0: Výpočet proudů. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [4] STŘEDA, O., BLÁHA, J.: *Posuzování zkratových poměrů v síti*. 1. vyd. Trutnov: Dům kultury ROH, 1988. ISBN 59-350-87
- [5] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P.: *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-534-87
- [6] RUSEK, Stanislav. *Teoretická Elektroenergetika*. Ostrava: Skripta VŠB-TU, 2011.
- [7] *Dimenzování vodičů* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/peds/PEDS-Opory.zip
- [8] ČSN 33 2000-4-43. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 4-43: Bezpečnost - Ochrana před nadproudy*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] *Energetické kabely* [online]. Kladno: nkt cables, 2013 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Energeticke_kabely_CZ-EN_2013.pdf
- [10] *Silové kabely a vodiče* [online]. nkt cables [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.nkt.com/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/1-AYKY+DS+CZ+EN.pdf
- [11] *Silové kabely a vodiče* [online]. nkt cables [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.nkt.com/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/1-CYKY+DS+CZ+EN.pdf
- [12] *6-AYKCY třížilové* [online]. nkt cables [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://81.0.246.66/nkt_pk/datasheets_pdf/6-AYKCY_3zil.pdf
- [13] *Stíněné kabely na 6 kV* [online]. nkt cables [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: http://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/6-AHKCY_three_core+DS+CZ+EN.pdf
- [14] *TECHNICKÁ DATA A PODKLADY PRO PROJEKTANTY* [online]. Elpro-Energo [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/tabulky-ekodesign/>
- [15] MEDVEC, Zdeněk. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách: návody do cvičení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-856-9.
- [16] Elektrizační soustava. In: *DOCPLAYER* [online]. 2008 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7916680-Elektrizacni-soustava.html>

Seznam příloh

Příloha A:	Úvodní list
Příloha B:	Výsledky
Příloha C:	Vstupní data